

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Долотов Б. И., Жабаров А. В., Колыхалов Д. Г., Марьин С. Б., Якимов В. И.
B. I. Dolotov, A. V. Zhabarov, D. G. Kolykhalov, S. B. Maryin, V. I. Yakimov

ПРОИЗВОДСТВО ЛИСТОВЫХ ШТАМПОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

MANUFACTURE OF STAMPED SHEET-METAL ELEMENTS FOR AIRBORN VEHICLES USING ENERGY-SAVING TECHNOLOGY

Долотов Борис Иванович – доктор технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru

Mr. Boris I. Dolotov – Doctor in Engineering, Associate Professor at the Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: ktsp@knastu.ru

Жабаров Александр Владимирович – магистр кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: alexzh@mail.ru

Mr. Alexandr V. Zhabarov – Master of Engineering, Department of Aircraft Building Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: alexzh@mail.ru

Колыхалов Дмитрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета», (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: dgk@mail.knastu.ru

Mr. Dmitry G. Kolykhalov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Aircraft Building Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: dgk@mail.knastu.ru

Марьин Сергей Борисович – доктор технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@knastu.ru

Mr. Sergey B. Maryin – Doctor of Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: maryinsb@knastu.ru

Якимов Виктор Иванович – доктор технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru

Mr. Viktor I. Yakimov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: kmtlp@knastu.ru

Аннотация. Рассмотрены энергоэффективные и ресурсосберегающие способы производства листовых изделий с использованием энергии замораживания воды.

Summary. The paper considers energy-efficient and resource-saving methods for stamping sheet-metal elements using the energy of frozen water.

Ключевые слова: ресурсосберегающие технологии, листовая заготовка, штамп для вытяжки, замораживание воды.

Key words: energy-efficient technologies, sheet-metal billet, drawing die.

УДК 621.983.7.001.573

23 ноября 2009 г был принят Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". Целью этого Федерального закона является создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Согласно нему, правовое регулирование в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности основывается на следующих принципах:

- 1) эффективное и рациональное использование энергетических ресурсов;
- 2) поддержка и стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности;
- 3) системность и комплексность проведения мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности;
- 4) планирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности;
- 5) использование энергетических ресурсов с учетом ресурсных, производственно-технологических, экологических и социальных условий. [2]

Кроме того, основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий определяют «Производственные технологии» и «Энергосберегающие технологии» как приоритетные направления развития науки, технологий и техники Российской Федерации, а направление «Энергосбережение» входит в перечень критических технологий Российской Федерации.

Данный Федеральный закон явился следствием сильного отставания России в области энергоэффективности и внедрения ресурсосберегающих технологических процессов на производстве. Так, по данным Международного Энергетического Агентства (совместно с Всемирным Банком) Россия занимала 12-е место среди худших, с точки зрения энергоемкости производства, стран. [3]

Актуальность разработки новых ресурсосберегающих процессов в перспективе повышается потому, что энергетическая стратегия развития отечественной промышленности определяет постоянное и долгосрочное повышение цен на энергоносители.

Под ресурсосберегающими технологическими процессами будем понимать:

- 1) энергоэффективные процессы;
- 2) процессы с минимальными затратами на подготовку производства;
- 3) процессы с минимальной трудоемкостью

В связи с тем, что доля штампованных деталей в современном самолете может достигать до 70 %, важным становится вопрос о разработке и внедрении прогрессивных ресурсосберегающих процессов в заготовительно-штамповочное производство деталей самолета.

На сегодняшний день наиболее прогрессивными технологическими процессами в области листовой штамповки являются процессы штамповки эластичными (см. рис. 1, а) и эластосыпучими средами (см. рис. 1, б). Штамповка эластичными средами позволяет сократить временные и материальные затраты на изготовление эластичного инструмента. Однако основными недостатками метода являются затраты на изготовление самого материала эластичного инструмента, затраты энергии на сжатие эластичной среды, а также достаточно быстрое старение эластичного инструмента, что ведет к потере его упругих свойств.

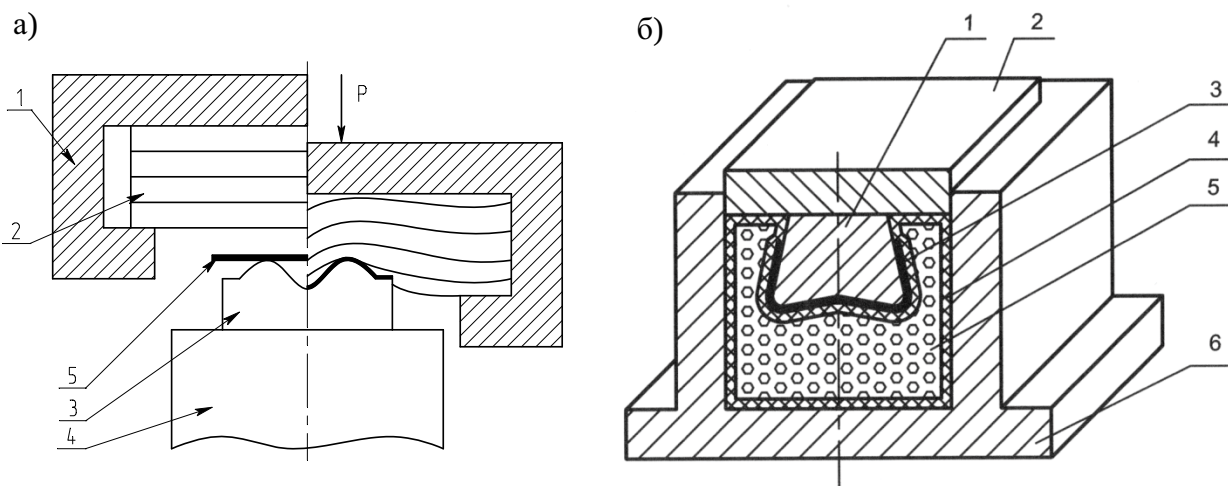


Рис. 1. Схемы листовой штамповки:

- а – схема штамповки резиной: 1 – стальная обойма, 2 – резиновая подушка, 3 – матрица, 4 – стол, 5 – заготовка;
- б – схема гибки-формовки деталей в закрытом объеме эластосыпучими средами: 1 – пуансон; 2 – пуансонодержатель; 3 – деталь в момент окончания гибки; 4 – эластичная оболочка; 5 – эластичные гранулы и смазка; 6 – контейнер

Предлагаемый метод обработки металлов давлением, способный решить описанные проблемы, основан на эффекте увеличения объема воды при замерзании. Деформирующее усилие возникает в результате замерзания воды в замкнутом объеме, образованном деформируемой заготовкой и рабочей камерой.

Этот метод можно отнести к энерго- и ресурсосберегающим технологиям, так как для процесса деформации не требуется больших затрат электроэнергии, дорогостоящего оборудования, сложной и высокоточной оснастки.

В листовой штамповке формоизменение заготовки наиболее часто осуществляется в условиях осевой симметрии деформирования. [1]

При формоизменении осесимметричных оболочек, имеющих двойную кривизну (см. рис. 2), с учетом характера изменения толщины заготовки уравнения равновесия сил в проекциях на нормаль и касательную к срединной поверхности удобно представить в виде [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\rho} \left[\rho S(\rho) \sigma_{\rho} \sin \psi \right] &= - \left(q_n + q_{\tau} \operatorname{tg} \psi \right) \rho + \left(a_n + a_{\tau} \operatorname{tg} \psi \right) \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho); \\ \frac{d}{d\rho} \left[\rho S(\rho) \sigma_{\rho} \right] &= S(\rho) \sigma_{\varphi} - \frac{q_{\tau}}{\cos \psi} \rho + \frac{a_{\tau}}{\cos \psi} \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ψ – угол наклона касательной к образующей, отсчитываемый против часовой стрелки от горизонтали; q_n – проекция удельного давления на нормаль, направленную к центру кривизны; q_{τ} – проекция удельного давления на касательную, направленную в сторону увеличения ρ ; a_n – проекция ускорения на нормаль; a_{τ} – проекция ускорения на касательную; γ – удельный вес материала; g – ускорение свободного падения.

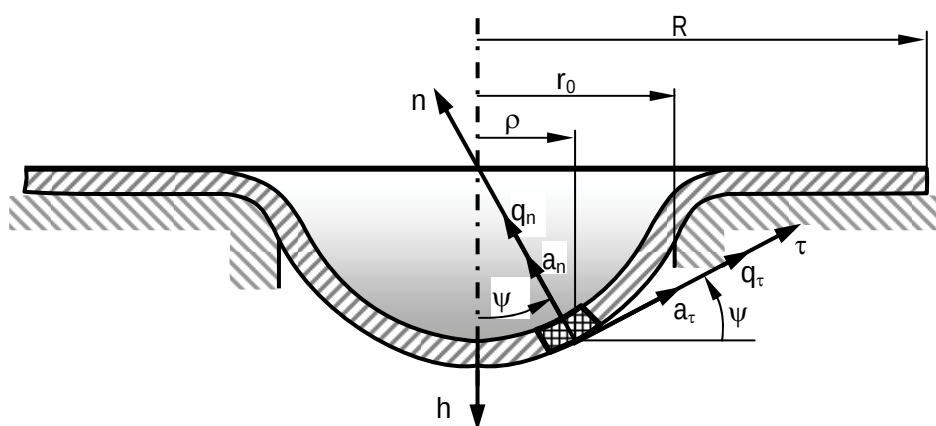


Рис. 2. Схема деформирования плоской заготовки

Уравнения равновесия (1) получены для положительных направлений удельных давлений и ускорений, указанных на рис. 2.

Данные уравнения описывают все процессы формоизменяющих операций плоской заготовки. В табл. 1 показано, как изменяются величины, входящие в уравнения, в зависимости от характера процесса, а также в зависимости от того, какой участок заготовки анализируется.

Таблица 1

Значения коэффициентов, входящих в уравнения (1), для различных технологических процессов

Процесс	Внутренний участок ($r_0 \geq \rho > 0$)	Внешний участок (фланец) ($R \geq \rho > r_0$)
Высокоскоростная формовка	$\psi = f_1(\rho); q_n = -f_2(\rho);$ $q_\tau = f_3(\rho); a_n = f_4(\rho);$ $a_\tau = f_5(\rho).$	$\psi = 0;$ $q_n = 0;$ $q_\tau = 0;$ $a_n = 0;$ $a_\tau = 0.$
Формовка резиной	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = -\mu_{TP} q;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Формовка жестким пуансоном	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -f_2(\rho); q_\tau = -\mu_{TP} f_2(\rho);$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Вытяжка	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -f_2(\rho); q_\tau = -\mu_{TP} f_2(\rho);$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Формовка жидкостью и газом	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = 0;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	
Пневмо-термическая формовка в режиме сверхпластичности	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = 0;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	

Так, для процессов формовки жидкостью или газом, а также для пневмо-термической формовки в режиме сверхпластичности эти уравнения после несложных преобразований можно представить в виде:

$$\sigma_p = \frac{q\rho}{2S(\rho)\sin\psi};$$

$$\frac{d}{d\rho}[\sigma_p S(\rho)] = \frac{\sigma_\phi - \sigma_p}{\rho} S(\rho). \quad (1a)$$

При рассмотрении внешнего участка, если трением на плоской части заготовки и на ребре матрицы пренебречь, равновесие элемента заготовки для всех процессов описывается одним последним уравнением системы (1). Заметим, что при принятых допущениях, т.е. $\mu_{TP} = 0$, это уравнение справедливо и для торообразного участка на ребре матрицы.

Рассмотрим процесс вытяжки листовой заготовки.

Штамп для вытяжки листовой заготовки (см. рис. 3, а) состоит из крышки штампа 4 с рабочей камерой 10 и основания 7. В основании имеется полость для установки сменной матрицы 8. С целью регулирования объёма рабочей камеры предусмотрена возможность установки вставок 1. Вставки крепятся внутри рабочей камеры на шпильки 3. В крышке штампа также установлен штуцер 5 с клапаном, через который в рабочую камеру поступает вода. Для удаления воздуха из рабочей камеры предусмотрен управляемый клапан 2. Воздух необходимо удалять для повышения КПД процесса, т.е. чтобы энергия расширения льда не тратилась на бесполезное сжатие воздуха. Для герметизации рабочей камеры на торцевой части крышки есть кольцевая проточка с уложенным в неё резиновым кольцом 9. Крышка штампа также выполняет роль прижима края заготовки, что препятствует образованию гофра. Кроме того, со стороны рабочей камеры на листовую заготовку 6 накладывается полиэтиленовая плёнка (на рис. 3 не показана). Полиэтиленовая плёнка не позволяет воде примёрзнуть к заготовке, благодаря чему улучшаются условия деформирования и качество поверхности изделия.

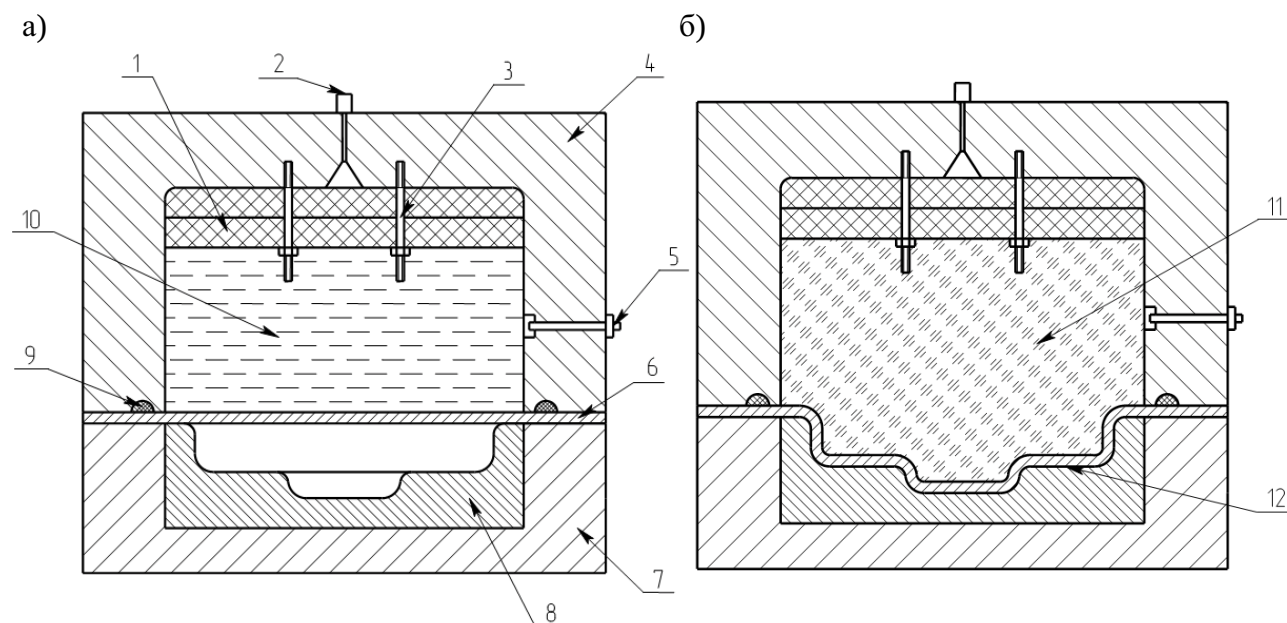


Рис. 3. Схема штампа для вытяжки листовой заготовки:
а – перед началом процесса; б – перед выемкой готового изделия

В основание 7 устанавливается матрица 8 необходимой конфигурации. Поверхность матрицы покрывается слоем смазки. Сверху помещается листовая заготовка 6 с полиэтиленовой плёнкой. Затем устанавливают крышку штампа 4 с заранее установленным

объёмом рабочей камеры 10. Далее крышку и основание стягивают каким-либо способом. В рабочую камеру через штуцер 5 под давлением подаётся вода. Воздух из рабочей камеры удаляется через управляемый клапан 2. Собранный и наполненный водой штамп помещается в морозильную камеру или, в холодное время года, на улицу.

При замерзании вода, превращаясь в лёд 11, расширяется за счёт чего и происходит деформация листовой заготовки, 12 – готовое изделие (см. рис. 3, б).

С помощью этой технологии относительно просто можно изготавливать нестандартные крупногабаритные изделия. Такой метод обработки металлов давлением наиболее успешно может применяться в регионах с холодным климатом. В таких регионах в холодное время года не требуется организация специальных мероприятий по замораживанию воды.

Данный метод не требует прикладывания внешних усилий и, в отличие от других методов, не требует специальных материалов. Кроме того вода, которая используется в качестве рабочего тела, может быть многократно использована, поэтому данный метод может быть также использован и в полевых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феоктистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности / С. И. Феоктистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 183 с.
2. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ // Российская газета. – 2009. – 27 ноября.
3. Энергоэффективность в России: скрытый резерв // Отчет Всемирного Банка. – М.: ЦЭНЭФ, 2009. – 166 с.
4. Газовые системы летательных аппаратов / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 459 с.
5. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
4. Моделирование процесса обжима полых и трубчатых заготовок при использовании ледяных стержней в качестве рабочего тела / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов, Р. В. Шпорт // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Наука о природе и технике. – 2011. – № IV-1 (8). – С. 78-85.
5. Технология изготовления деталей из листовых и трубных заготовок посредством замораживания воды / Б. Н. Марьин, А. М. Шпилев, В. И. Шпорт [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, Наука о природе и технике. – 2011. – № I-1 (5). – С. 67-71.



Долотов Б. И., Жабаров А. В., Колыхалов Д. Г., Макаров К. А., Марьин С. Б., Якимов В. И.
B. I. Dolotov, A. V. Zhabarov, D. G. Kolykhalov, K. A. Makarov, S. B. Maryin, V. I. Yakimov

ПРОГРЕССИВНЫЕ СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

ADVANCED METHODS FOR MANUFACTURE OF PIPING ELEMENTS IN AIRBORN VEHICLES

Долотов Борис Иванович – доктор технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Mr. Boris I. Dolotov – Doctor in Engineering, Associate Professor at the Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Жабаров Александр Владимирович – магистр кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: alexzh@mail.ru.

Mr. Alexandr V. Zhabarov – Master of Engineering, Department of Aircraft Building Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: alexzh@mail.ru.

Колыхалов Дмитрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: dgk@mail.knastu.ru.

Mr. Dmitry G. Kolykhalov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Aircraft Building Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: dgk@mail.knastu.ru.

Макаров Константин Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ОАО «Вертолеты России» (Россия, Москва). E-mail: mac_61@mail.ru.

Mr. Konstantin A. Makarov – Doctor of Engineering, Professor, ОАО "Vertolety Rossii" (JSC Russian Helicopters, Moscow). E-mail: mac_61@mail.ru.

Марьин Сергей Борисович – доктор технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@knastu.ru.

Mr. Sergey B. Maryin – Doctor of Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: maryinsb@knastu.ru.

Якимов Виктор Иванович – доктор технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Viktor I. Yakimov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur State). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Аннотация. Рассмотрены прогрессивные способы обжима и раздачи полых и трубчатых заготовок с использованием энергии замораживания воды и ледяных стержней.

Summary. The paper considers advanced methods for crimping and expanding hollow/tubular billets by using the force of water freezing and ice cores.

Ключевые слова: формоизменение трубчатой заготовки, обжим, раздача, замораживание воды, штамповая оснастка.

Key words: tubular billet forming, crimping, expanding, water freezing, press-work tooling.

УДК 621.983.7.001.573

Для повышения конкурентоспособности продукции необходимо внедрение в производство прогрессивных современных технологий. Их применение приводит к сокращению сроков освоения новых изделий, снижению себестоимости изготовления изделий и металлоемкости применяемой оснастки.

В этой связи представляется важной разработка и внедрение в производство прогрессивных технологий в области формоизменения трубчатых заготовок, поскольку детали из труб применяются практически во всех гидрогазовых системах летательных аппаратов.

Наиболее распространенными операциями формоизменения трубчатых заготовок являются их обжим и раздача.

На сегодняшний день существует множество способов обжима и раздачи трубчатых заготовок, наиболее прогрессивными направлениями которых являются электрогидравлическая штамповка (электроимпульсная или электромагнитная) (см. рис. 1, а), штамповка эластичными или эластосыпучими средами (см. рис. 1, б), а также штамповка с применением ледяных стержней или энергии расширения воды при её заморозке.

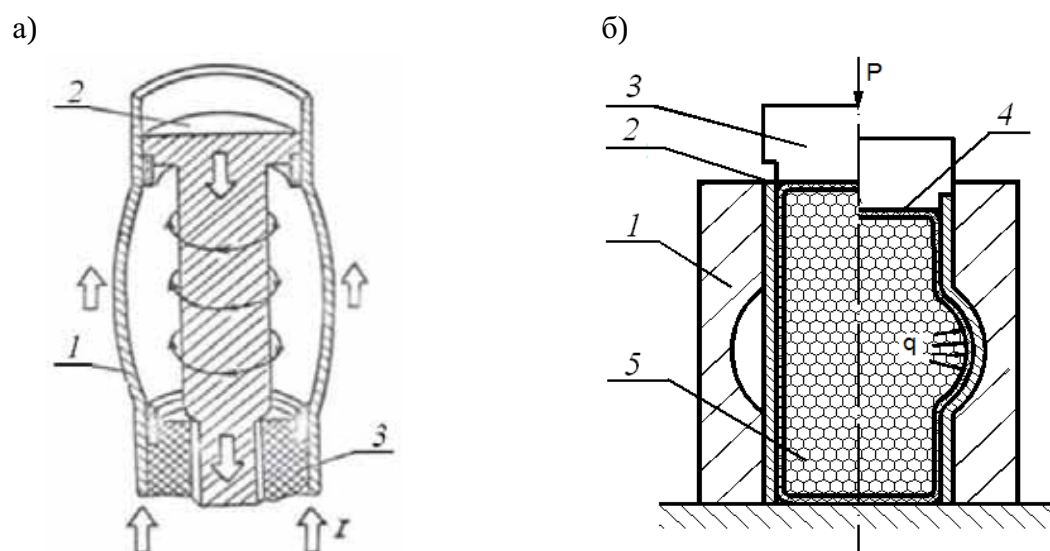


Рис. 1. Способы обжима и раздачи трубчатых заготовок

а – раздача трубчатой заготовки путем импульсного пропускания тока:

1 – заготовка; 2 – токопроводящий стержень; 3 – изоляция;

б – раздача трубчатой заготовки эластосыпучими средами: 1 – полуматрицы;

2 – трубная заготовка; 3 – пуансон; 4 – эластичная оболочка; 5 – наполнитель

Интерес представляют методы с применением ледяных стержней и энергии расширения воды при её заморозке, поскольку они обладают некоторыми конкурентными, по сравнению с другими прогрессивными методами, преимуществами:

1) низкая энергоемкость методов по сравнению с электрогидравлической штамповкой;

2) в отличие от штамповки эластичными и эластосыпучими средами, при которых наблюдается достаточно быстрое старение эластичного инструмента, у методов с применением льда подобный недостаток отсутствует;

3) отсутствие больших затрат на изготовление эластичного инструмента и изготовление материала, из которого он состоит.

Обжим (раздача) трубчатых заготовок с использованием ледяных стержней

В листовой штамповке формоизменение заготовки наиболее часто осуществляется в условиях осевой симметрии деформирования. В рассмотренном случае радиальные и тангенциальные напряжения, действующие в очаге деформаций, можно считать главными напряжениями, которые усредняются по толщине и относятся к срединной поверхности, как в безмоментной теории оболочек [2]

Силы трения и изгиба на ребре матрицы учитываются после получения окончательного решения по методике, изложенной в работе Е.А. Попова. К числу допущений относятся также основные гипотезы деформационной теории.

Для формоизменения трубчатой заготовки уравнение [2] равновесия имеет вид:

$$\frac{d}{d\rho}[\sigma_\rho S(\rho)] = \frac{\sigma_\varphi(1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha) - \sigma_\rho \left(1 + \mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho}\right)}{\rho} S(\rho). \quad (1)$$

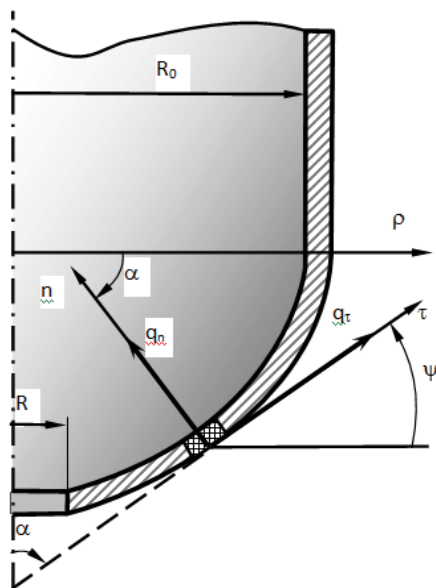


Рис. 2. Схема обжима трубчатой заготовки

Рассмотрим процесс обжима трубчатой заготовки (см. рис. 2).

При обжиме и вывороте внутрь

$$q_n = q(\rho), \quad q_\tau = \mu_{TP} q(\rho), \quad \psi = 90^\circ - \alpha.$$

Используя уравнение равновесия (1) и уравнения связи напряжений с деформациями

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{4}{3} E_{cek} (e_\rho + \frac{1}{2} e_\varphi); \\ \sigma_\varphi &= \frac{4}{3} E_{cek} (e_\varphi + \frac{1}{2} e_\rho); \\ e_\rho + e_\varphi + e_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

для случая несжимаемости материала и отсутствия температурных деформаций получим интегральное

уравнение равновесия в истинных деформациях:

$$\begin{aligned} e_\rho &= -\frac{1}{2} e_\varphi + \frac{3}{4} \cdot \frac{U(\rho)}{S(\rho) \cdot E_{cek}} \cdot \int_R^\rho \frac{S(\rho) E_{cek} e_\varphi (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha)}{\rho \cdot U(\rho)} d\rho + \\ &+ \frac{E_{cekR} \cdot S(R)}{E_{cek} \cdot S(\rho)} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) \cdot U(\rho), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$U(\rho) = \exp \left[- \int_R^\rho \frac{1 - \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha + 2\mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho}}{2\rho} d\rho \right]. \quad (4)$$

При анализе формоизменения трубчатой заготовки можно считать тангенциальные деформации известными:

$$e_\varphi = \ln \frac{\rho}{R_0}, \quad (5)$$

где R_0 – радиус заготовки (трубы).

Для определения граничных условий (см. рис. 2) необходимо учесть, что

$$E_{секR} \cdot \left(e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) = \frac{3}{4} \sigma_{\rho R}.$$

Подробнее рассмотрим обжим в тороидальной матрице (см. рис. 3).

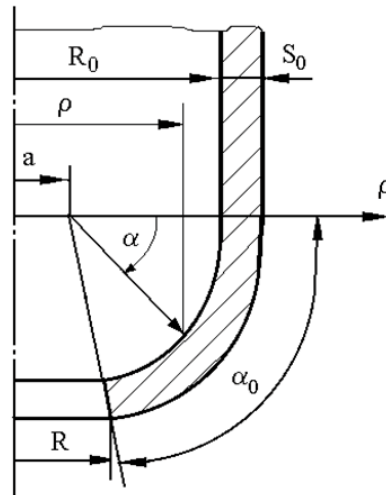


Рис. 3. Схема процесса обжима в тороидальной матрице

Выражая ρ через угол α , приведем уравнения (3) и (4) к виду:

$$e_\rho = -\frac{1}{2} e_\rho - \frac{3}{4} \frac{U(\alpha)}{E_{сек} S(\alpha)} \cdot \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{S(\alpha) E_{сек} e_\varphi r_0 (\sin \alpha + \mu_{TP} \cos \alpha)}{(r_0 \cos \alpha + a) \cdot U(\alpha)} d\alpha + \\ + \frac{E_{сек\alpha_0} S(\alpha_0)}{E_{сек} S(\alpha)} \cdot \left(e_{\rho\alpha_0} + \frac{1}{2} e_{\varphi\alpha_0} \right) \cdot U(\alpha), \quad (7)$$

где

$$U(\alpha) = \exp \left[\int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{r_0 \sin \alpha - 3\mu_{TP} r_0 \cos \alpha - 2\mu_{TP} a}{2(r_0 \cos \alpha + a)} d\alpha \right]. \quad (8)$$

Для обжима (выворота внутрь) получаем:

$$a = (R_0 - r_0), \\ e_\varphi = \ln \left[\frac{R_0 - r_0 (1 - \cos \alpha)}{R_0} \right];$$

Выражение (8) можно упростить:

$$U(\alpha) = \exp \left[\frac{1}{2} \ln \frac{r_0 \cos \alpha_0 + a}{r_0 \cos \alpha + a} + \frac{3}{2} \mu_{TP} (\alpha_0 - \alpha) + F(\alpha) \right], \quad (9)$$

где

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{2} \cdot \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{r_0 \cos \alpha + a}.$$

В зависимости от соотношения между r_0 и a выражение $F(\alpha)$ будет иметь различный вид. Рассмотрим все случаи обжима:

1) в сферической матрице – $a = 0$:

$$F(\alpha) = 0;$$

2) при $a^2 = r_0^2$, обжим при $a = r_0 = \frac{R_0}{2}$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP}}{2} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right);$$

3) при $a^2 < r_0^2$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} \cdot a}{2\sqrt{r_0^2 - a^2}} \times \ln \left[\frac{\left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + a + r_0 \right) \left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} - a - r_0 \right)}{\left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - a - r_0 \right) \left(\sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} + a + r_0 \right)} \right];$$

4) при $a^2 > r_0^2$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{\sqrt{a^2 - r_0^2}} \times \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right) \right].$$

На рис. 4 представлена схема штампа для обжима трубчатой заготовки. Штамп состоит из неразъемной матрицы 1 и основания 2. В матрицу 1 снизу вставлена трубчатая заготовка 3, внутри которой находится рабочее тело 4, выполненное из стержня льда.

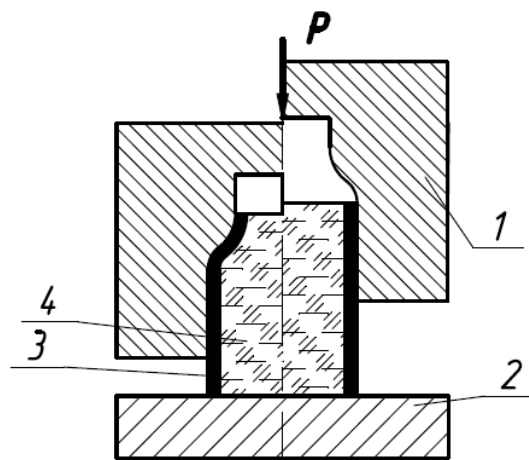


Рис. 4. Схема штампа для обжима трубчатой заготовки

На основании 2 устанавливают трубчатую заготовку 3, внутрь которой закладывают рабочее тело 4, выполненное из ледяного стержня. Посредством перемещения ползуна прессы с усилием P (на рис. 4 не показан) перемещается матрица 1, в результате чего происходит обжим трубы. Затем матрицу 1 поднимают вверх, производят выемку готовой детали с рабочим телом 4, которое впоследствии растает за счет положительной температуры рабочего помещения.

Теперь рассмотрим процесс раздачи трубчатой заготовки (см. рис. 5).

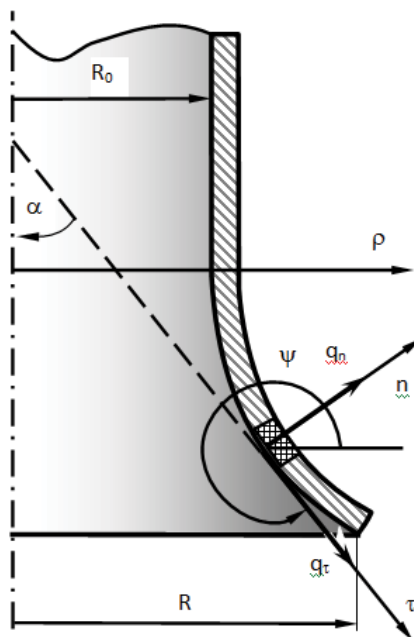


Рис. 5. Схема раздачи трубчатой заготовки

При раздаче и вывороте наружу

$$q_n = q(\rho), \quad q_\tau = -\mu_{TP} q(\rho), \quad \psi = 270^\circ - \alpha.$$

Аналогично с процессом обжима используем уравнения (1) – (5).

Схема процесса раздачи в тороидальной матрице приведена на рис. 6.

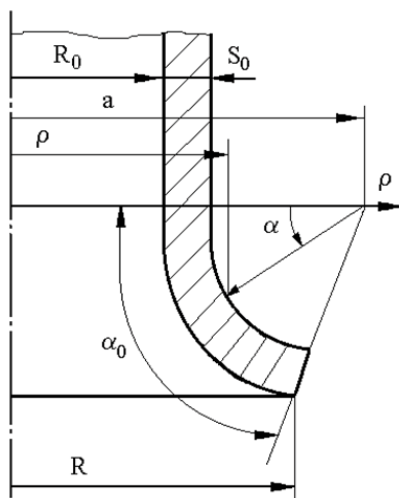


Рис. 6. Схема процесса раздачи в тороидальной матрице

Используем для этого уравнения (7) – (9):

1) для раздачи (выворота наружу):

$$a = -(R_0 - r_0),$$

$$e_\varphi = \ln \left[\frac{R_0 + r_0 (1 - \cos \alpha)}{R_0} \right];$$

2) при раздаче $a^2 > r_0^2$:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{\sqrt{a^2 - r_0^2}} \times \left[\arctg \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) - \arctg \left(\frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right) \right].$$

На рис. 7 представлен штамп для раздачи трубчатой заготовки. Разъемная матрица 2, установлена в жестком корпусе, состоящем из плиты основания 4, наружной обоймы 3, пуансона 1. В матрице 2 размещена трубчатая заготовка 6, внутри которой находится рабочее тело 5, выполненное из спрессованного снега или стержня льда.

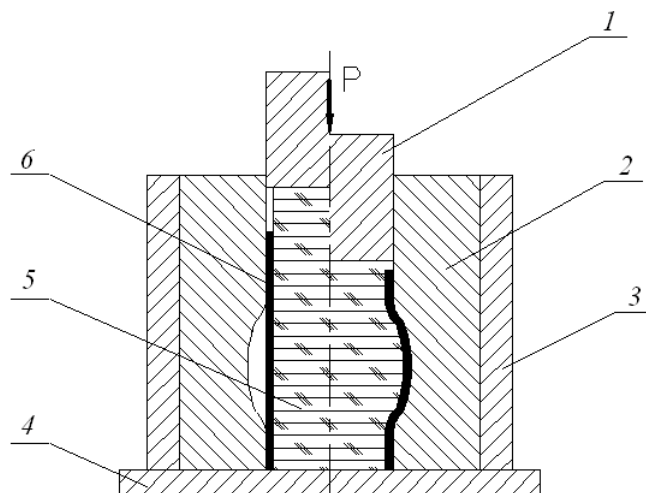


Рис. 7. Штамп для раздачи трубчатой заготовки с использованием ледяного стержня

В подготовленную матрицу 2 вставляют трубчатую заготовку 6, внутри которой размещено рабочее тело 5. Посредством перемещения ползуна прессы с усилием P перемещается пуансон 1. От пуансона усилие P передается через рабочее тело в зону деформирования трубчатой заготовки, в результате чего происходит раздача трубы. Затем пуансон поднимают вверх, производят разборку матрицы и выемку готовой детали с рабочим телом, которое впоследствии растаивает за счет положительной температуры рабочего помещения.

Обжим (раздача) трубчатых заготовок с применением энергии расширения воды при ее заморозке

Штамп для обжима тонкостенных трубчатых заготовок (см. рис. 8) состоит из корпуса 5, прижимной крышки 4 и съемной матрицы 2.

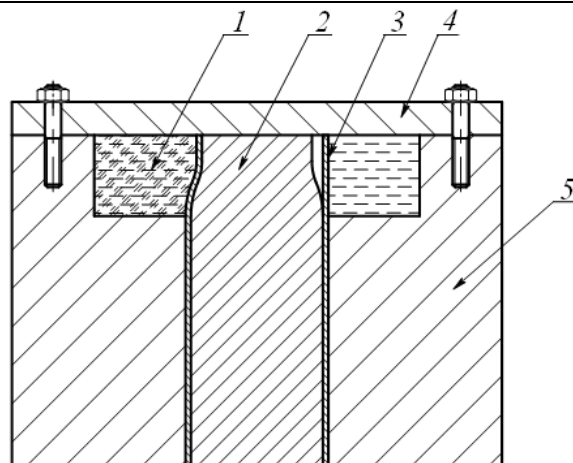


Рис. 8. Штамп для обжима трубчатой заготовки с использованием энергии расширения воды при ее заморозке

В корпус штампа вставляется трубчатая заготовка 3 с матрицей 2. В образовавшуюся полость между корпусом и заготовкой заливается вода и устанавливается крышка 4. Собранный штамп помещается в морозильную камеру. При замерзании объем воды увеличивается, и образующийся лёд 1 деформирует трубчатую заготовку.

Описанные методы обработки металлов давлением с применением ледяных стержней и энергии расширения воды при ее заморозке наиболее успешно могут применяться в регионах с холодным климатом. В таких регионах в холодное время года не требуется организация специальных мероприятий по замораживанию воды.

Методы формоизменения трубчатых заготовок с использованием льда и эффекта расширения воды при ее заморозке можно отнести к энерго- и ресурсосберегающим, так как для процесса деформации не требуется больших затрат электроэнергии, дорогостоящего оборудования, сложной и высокоточной оснастки, что открывает возможность для использования описанных методов в условиях ограничения доступа к ремонтной базе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газогазовые системы летательных аппаратов / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 459 с.
2. Феоктистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности / С. И. Феоктистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 183 с.
3. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
4. Моделирование процесса обжима полых и трубчатых заготовок при использовании ледяных стержней в качестве рабочего тела / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин, С. И. Феоктистов, Р. В. Шпорт // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Наука о природе и технике. – 2011. – № IV-1 (8). – С. 78-85.
5. Технология изготовления деталей из листовых и трубных заготовок посредством замораживания воды / Б. Н. Марьин, А. М. Шпилев, В. И. Шпорт [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Наука о природе и технике. – 2011. – № I-1 (5). – С. 67-71.

Кузьмин В. М., Сериков А. В. Степанова И. П.
V. M. Kuzmin, A. V. Serikov, I. P. Stepanova

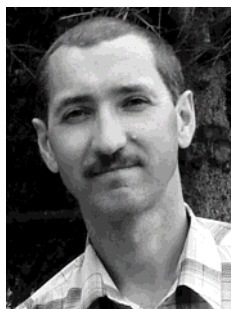
**ОСОБЕННОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА**

**SPECIFIC FEATURES OF DECENTRALIZED ENERGY-SUPPLY SYSTEMS BASED ON
TRANSFORMER-TYPE HEATER ELEMENTS**



Кузьмин Вячеслав Матвеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27); 8-914-176-44-72. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav M. Kuzmin – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur) 681013, 27 Lenina pr., tel.: + (7914) 176-44-72. E-mail: kem@knastu.ru



Сериков Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27); 8-909-899-05-98. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Alexander V. Serikov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur) 681013, 27 Lenina pr., tel.: + (7909) 899-05-98. E-mail: kem@knastu.ru



Степанова Ирина Павловна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Ms. Irina P. Stepanova – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Health@Safety, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы внедрения децентрализованных систем теплоснабжения и перспективы их развития в России. Сформулированы особенности автономных систем электроотопления и горячего водоснабжения, выполненных на основе нагревательных элементов трансформаторного типа. Приведены требования к нагревательным устройствам и автономным источникам электропитания, применяемым в децентрализованных системах энергообеспечения.

Summary. The paper considers implementation problems of decentralized heat-supply systems and their future in Russia. Specific characteristics are defined for autonomous electrical heating and hot-water supply systems based on transformer-type heater elements. Requirements and specifications are offered for heaters and autonomous electric power supplies to be used in decentralized energy-supply systems.

Ключевые слова: автономная система энергообеспечения, нагревательный элемент трансформаторного типа, децентрализованное теплоснабжение, автономный источник электропитания.

Key words: autonomous energy-supply system, transformer-type heater element, decentralized heat supply, autonomous electric power supply.

Системы децентрализованного энергообеспечения с источниками энергии, работающими на одного потребителя (без электрических и тепловых сетей), в настоящее время в России не развиты. Однако с учетом постоянно возрастающих тарифов и острой необходимости создания энергосберегающих технологий такие системы находятся в первом ряду приоритетных направлений устойчивого развития регионов. Как правило, автономные энергосистемы создаются преимущественно по традиционным схемам и построены на базе дизель-электрических установок, теплогенераторов, а также отопительных печей с низким КПД и имеют значительные выбросы вредных веществ в атмосферу, поэтому находят применение только при отсутствии централизованных систем электро- и теплоснабжения. Применяются также автономные системы горячего водоснабжения с использованием электронагрева.

Резко возросший в последнее время интерес к системам децентрализованного теплоснабжения объясняется, прежде всего, неудовлетворительным качеством централизованного теплоснабжения при явной тенденции к повышению стоимости отпускаемой теплоты. Повышение тарифа на тепло нельзя объяснить только ростом цен на энергоносители. Значительная его часть определяется непроизводительными потерями энергии (при транспортировании, отсутствии автоматизации и пр.) и повышенной материалоёмкостью тепловых и электрических сетей. За рубежом, в том числе для крупных потребителей, наряду с системами централизованного теплоснабжения широкое применение имеют системы децентрализованного энергоснабжения на основе высокоэффективных автоматизированных источников, обеспечивающих меньший расход энергоресурсов (на 10...30 %), снижение материалоёмкости в 2...5 раз, значительное сокращение сроков строительства, чем при централизованном энергообеспечении.

Применяемые в системах децентрализованного энергообеспечения теплогенераторы зарубежного производства представляют собой, как правило, функционально законченные газовые водогрейные аппараты. Они могут использоваться как в составе котельной для теплоснабжения группы потребителей, так и для децентрализованного теплоснабжения с установкой на крыше или в чердачном помещении здания. Возможна установка модулей в подвальном помещении, пристройке к зданию или на техническом этаже. Централизованное теплоснабжение (тепловая сеть) отсутствует. Котельная, при соответствующей диспетчеризации, может работать «на замке», без постоянного обслуживающего персонала. Опыт применения систем децентрализованного теплоснабжения в стране невелик, так как владельцы импортного оборудования мало, а выпускаемые промышленностью теплогенераторы типа АГВ и АОГВ имеют ограниченную мощность.

Следует выделить несколько аспектов, которые проявляются при внедрении систем децентрализованного теплоснабжения:

а) не требуется дефицитных труб, теплоизоляционных и строительных материалов, таким образом, не сокращается программа строительства и реконструкции традиционных систем теплоснабжения, а дополняется вводом мощностей по источникам теплоты, прежде всего за счет производства на предприятиях, ранее не работавших для нужд жилищно-коммунального хозяйства;

б) исключается отвод земельных площадей под сооружение котельных, ТЭЦ и тепловых сетей;

в) не только обеспечивается собственно экономия топлива за счет высокого КПД и автоматизации отпуска теплоты, но благодаря организованному учёту расхода теплоты (топлива) появляются возможности внедрения действенного хозяйственного механизма управления энергосбережением;

г) требуется более квалифицированное обслуживание, но одновременно создаются предпосылки для внедрения новых, более совершенных организационных форм в жилищно-



коммунальном хозяйстве (арендный подряд, сервисное обслуживание и пр.), что особенно актуально в условиях приватизации и самоуправления;

д) появляется возможность существенного снижения затрат на внутридомовые системы отопления за счёт перехода на трубы меньшего диаметра, применения неметаллических материалов, разделённых систем и т. п.;

е) расширяются масштабы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, ограниченные трудностями совмещения с системами централизованного теплоснабжения.

Надёжность систем децентрализованного теплоснабжения обосновывается многоблочностью котельных и значительно более низкой повреждаемостью электрических и газовых сетей по сравнению с водяными тепловыми сетями. Естественно, что такие системы на данном этапе не могут и не должны полностью решить проблему обеспечения растущих тепловых нагрузок, однако их применение может весьма экономично дополнять развитие существующих централизованных систем уже в ближайшем будущем, например, в следующих случаях:

а) при строительстве новых или реконструкции (с ростом тепловых нагрузок) старых зданий в районах, где по экологическим или другим ограничениям затруднено строительство крупных источников теплоты;

б) при выходе из строя теплотрасс в условиях, затрудняющих их перекладку (насыщение транспортными и инженерными коммуникациями, наличие памятников архитектуры и пр.);

в) при обеспечении следующих групп потребителей:

– расположенных в конце существующих тепломагистралей и испытывающих дефицит теплоты в связи с ростом тепловых нагрузок по трассе, снижением мощности источника теплоты или пропускной способности теплопроводов;

– в районах новостроек до ввода в действие тепломагистралей и источника централизованного теплоснабжения, после чего теплогенераторы систем децентрализованного теплоснабжения могут демонтироваться для установки на других объектах или использоваться как пиково-резервные источники.

– когда перерывы теплоснабжения или горячего водоснабжения недопустимы (в медицинских учреждениях) или влекут за собой существенные экономические потери (в гостиницах).

В настоящее время в населённых пунктах России применение систем децентрализованного электро- и теплоснабжения ограничено, прежде всего, вследствие недостатка технически совершенных источников теплоты. Отставание отечественных разработок и серийного производства высокоэффективных систем определяется, с одной стороны, преобладавшей ранее тенденцией централизации и монополизации в производстве электроэнергии и теплоты и, с другой стороны, отсутствием качественного комплектующего оборудования. В то же время отечественная промышленность, ранее ориентированная на выполнение оборонных заказов, в состоянии выполнить эти разработки.

Большинство применяемых в России децентрализованных систем электроотопления и горячего водоснабжения выполнены на базе выпускаемых электроводонагревателей ЭПЗ, САОС, ВЭТ и др., либо реализующими электродный способ нагрева воды, либо содержащими в качестве нагревательных элементов трубчатые электронагреватели. Следует отметить, что такие недостатки, как низкая степень надёжности и безопасности, присущие устройствам таких типов, в значительной степени усугубляются с ростом единичной мощности децентрализованной системы энергообеспечения.

Использование в таких системах в качестве нагревательных элементов трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой [1] позволяет устранить указанные недостатки, однако требует использования специальных принципов управления и устройств электропитания. Необходимость разработки новых принципов и систем управления обусловлена сле-

дующими особенностями децентрализованных систем электроотопления и горячего водоснабжения, выполненных на основе нагревательных элементов трансформаторного типа:

- 1) возможность выполнения систем теплоснабжения на широкий диапазон номинальных мощностей (от 0,5 до 800 кВт);
- 2) возможность подключения к электрическим сетям с напряжением до 6...10 кВ;
- 3) возможность выполнения в одном модуле понижающей трансформаторной подстанции и нагревательного элемента;
- 4) улучшение массогабаритных показателей системы при питании первичной обмотки нагревательного элемента токами повышенной частоты;
- 5) высокая степень надёжности нагревательных элементов, определяющая специфику требований к элементной базе и конструкциям коммутирующей аппаратуры и регуляторов;
- 6) обеспечение II класса по электробезопасности, диктующее требования к устройствам защиты;
- 7) наличие апериодических составляющих токов при включении и в других переходных режимах работы;
- 8) нелинейность параметров нагревательных элементов, обусловленная насыщением магнитопровода трансформатора и эффектом вытеснения тока во вторичной обмотке;
- 9) возможность возникновения перенапряжений при отключениях и в переходных режимах работы;
- 10) необходимость точного определения момента подключения каждой из фаз первичной обмотки трансформатора к сети.

При эксплуатации децентрализованной системы горячего водоснабжения и отопления в проточном режиме требуется получение горячей воды с определенной и относительно стабильной температурой. Следовательно, система должна иметь устройство уставки температуры с соответствующим диапазоном, а также устройство стабилизации температуры выходной воды, позволяющее поддерживать температуру воды независимо от расхода, колебаний питающего напряжения, изменений температуры воды на входе. Для достижения минимальной погрешности стабилизации температуры необходим контур, включающий быстродействующие элементы: датчик температуры, тиристорный коммутатор с системой управления и т.д. Обычно потребитель имеет несколько точек разбора горячей воды, поэтому необходимо иметь конструкцию гидросистемы горячего водоснабжения, рассчитанную на давление в водопроводной сети холодного водоснабжения.

Использование системы в проточном режиме более экономично, чем в аккумуляционном, так как нет потерь при хранении горячей воды. Конструкция электронагревателя должна предусматривать утилизацию потерь в первичной обмотке и магнитопроводе трансформатора непосредственно в воду, а камера нагрева воды должна иметь теплоизоляцию. Нагревательный элемент должен автоматически отключаться при отсутствии разбора воды, что уменьшает неоправданный расход энергии и предотвращает возможность возникновения аварийных режимов работы.

Системы с аккумуляцией тепловой энергии более предпочтительны в тех случаях, когда источник электропитания имеет ограниченную мощность или включается в работу периодически, а также при использовании нагревательных элементов в качестве балластной нагрузки.

Нагревательный элемент должен быть рассчитан на номинальную мощность в экстремальных условиях (наибольший расход и максимальная температура воды, длительный режим работы и др.).



Электронагреватель должен исключать внесение помех в сеть при регулировании и обеспечивать симметричную нагрузку трёхфазной сети. Выполнение этого условия может быть достигнуто подключением первичной обмотки нагревательного элемента трансформаторного типа к сети в момент времени, соответствующий ожидаемому переходу вынужденной составляющей первичного тока через ноль, или подключением вынесенной активной нагрузки к вторичной обмотке в момент времени, соответствующий переходу вторичного напряжения через ноль [2].

Указанные особенности нагревательных устройств, используемых в децентрализованных системах энергоснабжения, во многом определяют специфику источников электропитания и устройств управления.

В свою очередь, автономные источники электропитания имеют особенности, обусловленные видом энергоустановки (ветроэлектростанция, микроГЭС, дизель-электростанция и др.), типом генератора, наличием полупроводникового преобразователя и т.д.

Как правило, частота вращения вала приводного двигателя автономной энергоустановки изменяется, что приводит к изменению частоты выходного напряжения генератора. Стабилизация частоты может быть обеспечена либо постоянством скорости вращения вала (привод постоянной скорости, автобалластная нагрузка), либо с помощью полупроводниковых преобразователей. Потребители электроэнергии в децентрализованных энергосистемах можно разделить на две группы:

- 1) потребители, требующие высокого качества питающего напряжения, к ним относятся радиоэлектронные устройства, вычислительная техника, электропривод;
- 2) потребители, не критичные к качеству питающего напряжения, к ним относятся электроосветительные устройства, электронагреватели и др.

Рассматриваемые устройства электронагрева представляют собой трансформаторы с короткозамкнутой вторичной обмоткой особой конструкции, выполняющей функции тепловыделяющего элемента. При изменении частоты питающего напряжения изменяются электродвижущие силы и индуктивные сопротивления обмоток, потери мощности в магнитопроводе, потребляемая и полезная мощность. Поэтому важно установить взаимосвязь между частотой питающего напряжения, определяемой генератором автономного источника электропитания, и параметрами нагревательных элементов трансформаторного типа, а также определить наиболее приемлемые типы генераторов для децентрализованных энергосистем, в которых применяются нагреватели трансформаторного типа.

Таким образом, в работе рассмотрены проблемы внедрения децентрализованных систем теплоснабжения и перспективы их развития в России. Одним из наиболее эффективных путей повышения качества и надёжности таких систем является использование для горячего водоснабжения и отопления электронагревательных устройств на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой. Сформулированы особенности автономных систем электроотопления и горячего водоснабжения, выполненных на базе нагревательных элементов трансформаторного типа. Приведены требования к нагревательным устройствам и автономным источникам электропитания, входящим в децентрализованную систему энергообеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин, В. М. Разработка и исследование трансформаторов для установок электроводонагрева / В. М. Кузьмин, А. В. Сериков // Электротехника. – 2001. – № 7. – С. 45-51.
2. Кузьмин, В. М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа / В. М. Кузьмин. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 143 с.

Фролов А.В., Кузьмин Р.В., Степанова И.П.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ С МНОГОПЕТЛЕВОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ К ИЗМЕНЕНИЮ НОМИНАЛОВ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Фролов А. В., Кузьмин Р. В., Степанова И. П.

A. V. Frolov, R. V. Kuzmin, I. P. Stepanova

**ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ
С МНОГОПЕТЛЕВОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ
К ИЗМЕНЕНИЮ НОМИНАЛОВ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**RESPONSIVITY OF MULTIPLE-LOOP REVERSE FEEDBACK ACTIVE ELECTRIC-
WAVE FILTERS TO THEIR COMPONENT RATING VARIATION**

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Kpe@kmastu.ru.

Mr. Alexey V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Kpe@kmastu.ru

Кузьмин Роман Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Kem@knastu.ru.

Mr. Roman V. Kuzmin – PhD in Engineering, Assistant Professor at the Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Kem@knastu.ru.

Степанова Ирина Павловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

Ms. Irina P. Stepanova – Doctor of Engineering, Professor, Head of Department of Life&Safety, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния изменения номиналов пассивных элементов активных фильтров нижних и верхних частот 1-го и 2-го порядков с многопетлевой отрицательной обратной связью на частоту среза, коэффициент усиления, относительную ширину переходной области. Показано, что оптимальный подбор типов пассивных элементов позволяет полностью компенсировать температурное изменение параметров фильтров.

Summary. The paper presents the results of a research of passive components' rating variation impact upon active filter parameters: low-pass filters and high-pass filters of the first and second orders with multiple-loop reverse feedback. Among the analyzed parameters are: amplification factor, cutoff frequency and relative transition region range. It was established that the optimal selection of passive elements allows to fully compensate the temperature error of filter parameters.

Ключевые слова: чувствительность, электрические фильтры, схемы Рауха, многопетлевая отрицательная обратная связь.

Key words: responsivity, electric-wave filter, multiple-loop reverse feedback, Rauchian circuits.

УДК 621.3

Введение

Важным этапом в расчёте аналоговых электрических схем является определение эксплуатационных характеристик элементов схемы, в том числе определение допустимого температурного коэффициента ёмкости или сопротивления, допустимой погрешности номинала

элемента и т.д. Установка завышенных требований к эксплуатационным характеристикам радиоэлементов ведёт к необоснованному ухудшению экономических показателей изделия. Заниженные требования приводят к значительному отклонению реальных номиналов элементов от расчётных значений, что обуславливает возникновение погрешностей параметров схемы. При этом статические погрешности номиналов элементов (вызванные низкой точностью расчётов, грубым округлением расчётных величин до реально существующих, а также погрешностью изготовления элементов) остаточно легко устраняются за счёт использования подстроечных элементов. Для устранения динамических погрешностей, вызванных, например, изменением условий окружающей среды (главным образом, температуры), необходимо применение специальных технических решений. Поэтому для определения оптимальных эксплуатационных характеристик радиоэлементов необходимо тестировать проектируемые схемы на чувствительность к изменению номиналов их элементов.

Активные фильтры в настоящее время достаточно широко распространены в различных областях аналоговой техники. Из всего многообразия схемных решений наибольшую популярность получили схемы Салена-Кея и Рауха, также называемые схемами с многопетлевой отрицательной обратной связью (МОС). В практике в основном используются звенья 1-го и 2-го порядков, а схемы более высоких порядков реализуются путём их каскадного соединения.

В связи с вышеизложенным авторами были проведены исследования параметрических чувствительностей наиболее распространённых схем активных фильтров с МОС 1-го и 2-го порядков.

Методика исследований

В ходе исследований анализировались следующие схемы фильтров (см. рис. 1 – 2): фильтры верхних частот (ФВЧ); нижних частот (ФНЧ) с МОС (схемы Рауха). Исследовались фильтры 1-го и 2-го порядков [1; 3]. Во время экспериментов исследовались следующие наиболее важные параметры передаточных характеристик фильтров: коэффициент усиления в полосе пропускания (K_u); частота среза (f_c); относительная ширина переходной области (TW).

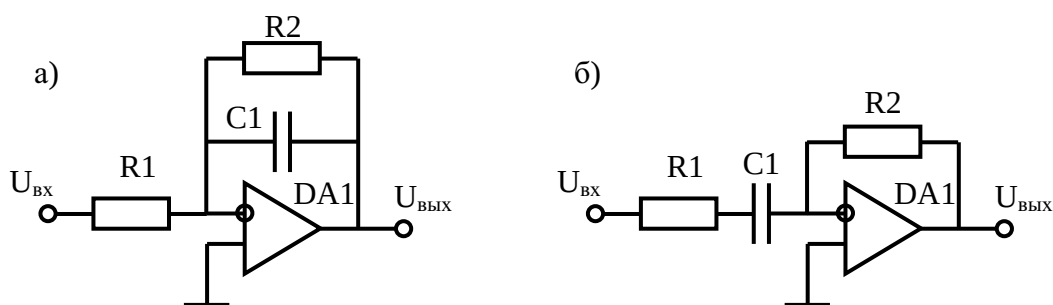


Рис. 1. Исследуемые схемы ФНЧ (а) и ФВЧ (б) 1-го порядка с МОС

Относительная чувствительность параметра F к изменению значения x рассчитывалась по формуле $S_x^F = \frac{x}{F} \cdot \frac{dF}{dx}$ [2].

Анализ чувствительности параметров фильтров к изменению номиналов элементов схемы выполнялся аналитически по передаточным функциям схем с использованием программы *Mathcad*. В расчётах не учитывались параметры применяемого операционного усилителя – предполагалось, что его параметры близки к идеальным. Для проверки правильности расчётов проводилось моделирование работы схемы в программе *Multisim* с использованием моделей реальных элементов.

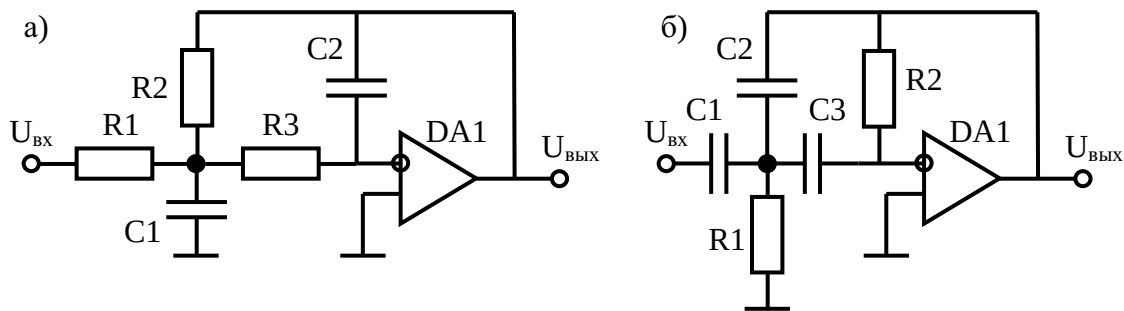


Рис. 2. Анализируемые схемы ФНЧ (а) и ФВЧ (б) 2-го порядка с МОС

Результаты исследований

Полученные значения относительных чувствительностей параметров фильтров к изменению номиналов элементов схем представлены в табл. 1 – 3 и на рис. 3 – 4. Приведённые данные получены следующим образом.

Расчёт чувствительности ФНЧ 1-го порядка с МОС

Анализируемая схема представлена на рис. 1, а. Передаточная функция фильтра в

комплексном виде после преобразования Лапласа: $H(w) = -\frac{1}{j \cdot w + \frac{R1 \cdot C1}{R2 \cdot C1}}$, где $R1, R2, C1$ –

номиналы элементов схемы, Ом, Ф; w – круговая частота, рад/с; j – мнимая единица: $j = \sqrt{-1}$, $w = 2 \cdot \pi \cdot f$, где f – частота, Гц.

Коэффициент усиления фильтра равен модулю передаточной функции на частоте 0 Гц: $K_u = |H(0)| = -\frac{R2}{R1}$. В связи с чем чувствительность коэффициента усиления равна:

$$S_{R1}^{K_u} = \frac{R1}{K_u} \cdot \frac{dK_u}{dR1} = -1, \text{ аналогично } S_{R2}^{K_u} = \frac{R2}{K_u} \cdot \frac{dK_u}{dR2} = 1 \text{ и } S_{C1}^{K_u} = \frac{C1}{K_u} \cdot \frac{dK_u}{dC1} = 0.$$

После решения уравнения передаточной функции фильтра относительно частоты получаем: $w(a) = \frac{\sqrt{10^{0,1a} - 1}}{R2 \cdot C1}$, где w – частота, на которой затухание коэффициента передачи фильтра относительно коэффициента усиления составляет a дБ. Из полученного выражения находим частоту среза (w_c), то есть частоту, на которой спад коэффициента передачи составляет 3 дБ: $w_c = w(3) = \frac{\sqrt{10^{0,1 \cdot 3} - 1}}{R2 \cdot C1} = \frac{1}{R2 \cdot C1}$. Чувствительности частоты среза представлены в табл. 1.

Начальная частота полосы задерживания (w_3) определяется как частота, на которой ослабление сигнала снижается на определённую величину a_3 :

$$w_3 = w(a_3) = \frac{\sqrt{10^{0,1a_3} - 1}}{R2 \cdot C1} = w_c \cdot \sqrt{10^{0,1a_3} - 1}. \text{ Относительная ширина переходной области (TW)}$$

определяется следующим образом: $TW = 1 - \frac{w_3}{w_c} = 1 - \sqrt{10^{0,1a_3} - 1}$. То есть относительная ширина

на переходной области не зависит от номиналов элементов схемы.

Расчёт чувствительности ФВЧ 1-го порядка с МОС



Анализируемая схема представлена на рис. 1, б. Передаточная функция фильтра:

$$H(w) = \frac{-\frac{R2}{R1} \cdot (j \cdot w)}{(j \cdot w) + \frac{1}{R1 \cdot C1}}. \text{ Коэффициент усиления фильтра: } K_u = |H(\infty)| = -\frac{R2}{R1}. \text{ Решение уравне-}$$

ния передаточной функции относительно частоты: $w(a) = \frac{1}{R1 \cdot C1} \cdot \frac{1}{\sqrt{10^{0,1a} - 1}}$. Следовательно,

частота среза и относительная ширина переходной области будут следующими: $w_c = \frac{1}{R1 \cdot C1}$;

$TW = 1 - \frac{1}{\sqrt{10^{0,1a_s} - 1}}$. Чувствительности параметров фильтра представлены в табл. 1.

Таблица 1

Относительные чувствительности параметров схем фильтров 1-го порядка
к изменению номиналов их элементов

Тип фильтра	ФНЧ			ФВЧ		
Элемент	R1	R2	C1	R1	R2	C1
Параметр	Чувствительность					
K_u	-1	1	0	-1	1	0
w_c	0	-1	-1	-1	0	-1
TW	0	0	0	0	0	0

Расчёт чувствительности ФНЧ 2-го порядка с МОС

Анализируемая схема представлена на рис. 2, а. Передаточная функция фильтра:

$$H(w) = \frac{1}{R1 \cdot R3 \cdot C1 \cdot C2} \cdot \frac{1}{(j \cdot w)^2 + (j \cdot w) \cdot \frac{1}{C1} \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} \right) + \frac{1}{R2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot C2}}. \text{ Коэффициент}$$

усиления фильтра равен: $K_u = \frac{R2}{R1}$.

Выражение частоты среза непосредственно из формулы передаточной функции достаточно затруднительно, а получаемое выражение относительно громоздко. Поэтому частоту среза можно выразить через коэффициенты передаточной функции ФНЧ 2-го порядка. Передаточная функция ФНЧ в общем случае определяется следующим образом:

$$H(w) = \frac{K_u \cdot C \cdot w_c^2}{(j \cdot w)^2 + B \cdot w_c \cdot (j \cdot w) + C \cdot w_c^2}, \text{ где } B \text{ и } C - \text{коэффициенты передаточной функции,}$$

зависящие от вида аппроксимации передаточной функции и неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) [3]. Для монотонной аппроксимации Баттерворта $C = 1$. Сопоставляя передаточную функцию ФНЧ с анализируемой передаточной функцией, полу-

чаем следующее выражение для частоты среза: $w_c = \frac{1}{\sqrt{C \cdot R2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot C2}}$. Чувствительности

параметров ФНЧ 2-го порядка представлены в табл. 2.

Таблица 2

Относительные чувствительности параметров ФНЧ 2-го порядка к изменению номиналов элементов

Тип фильтра	Параметр	Чувствительность к изменению номинала элементов					
		$R1$	$R2$	$R3$	$C1$	$C2$	C
Все	K_u	-1	1	0	0	0	---
Баттерворта	w_c	0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	---
Чебышева							-0,5
Баттерворта	TW	0	0	0	0	0	---
Чебышева							См. рис. 3

Примечание: C – коэффициент передаточной функции ФНЧ

Начальные частоты полосы задерживания фильтров Баттерворта и Чебышева определяются следующим образом [3]: $w_z = w_c \cdot \sqrt[2m]{10^{0,1\alpha_z} - 1}$ и $w_z = w_c \cdot ch \left(\frac{arch \left(\frac{\sqrt{10^{0,1\alpha_z} - 1}}{\sqrt{10^{0,1\alpha_n} - 1}} \right)}{m} \right)$, где

m – порядок фильтра; α_n – амплитуда пульсаций АЧХ в полосе пропускания, дБ. Следовательно, относительная ширина переходной области будет определяться следующим образом:

$TW = 1 - \sqrt[4]{10^{0,1\alpha_z} - 1}$ и $TW = 1 - ch \left(\frac{arch \left(\frac{\sqrt{10^{0,1\alpha_z} - 1}}{\sqrt{10^{0,1\alpha_n} - 1}} \right)}{2} \right)$ соответственно. Чувствительности от-

носительной ширины переходной области изображены на рис. 3.

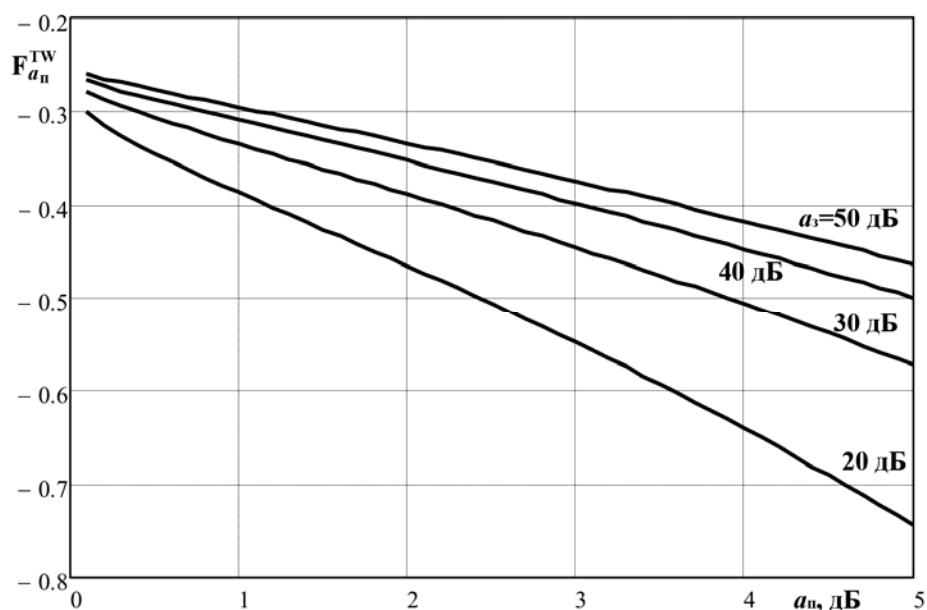


Рис. 3. Зависимость относительной чувствительности ширины переходной области от неравномерности АЧХ в полосе пропускания ФНЧ Чебышева 2-го порядка при различных значения минимального затухания АЧХ в полосе задерживания

Расчёт чувствительности ФВЧ 2-го порядка с МОС

Анализируемая схема представлена на рис. 2, б. Передаточная функция фильтра:

$$H(\omega) = \frac{C1}{C2} \cdot \frac{(j \cdot \omega)^2}{(j \cdot \omega)^2 + (j \cdot \omega) \cdot \frac{C1+C2+C3}{R2 \cdot C2 \cdot C3} + \frac{1}{R1 \cdot R2 \cdot C2 \cdot C3}}.$$

Коэффициент усиления фильтра в

полосе пропускания равен: $K_u = \frac{C1}{C2}.$

Передаточная функция ФВЧ в общем виде имеет следующий вид:

$$H(\omega) = \frac{K_u \cdot (j \cdot \omega)^2}{(j \cdot \omega)^2 + \frac{B \cdot \omega_c}{C} \cdot (j \cdot \omega) + \frac{\omega_c^2}{C}},$$

где B и C – коэффициенты передаточной функции [3].

Сопоставляя выражения передаточной функции ФВЧ, определяем частоту среза:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{C}{R1 \cdot R2 \cdot C2 \cdot C3}}.$$

Чувствительности параметров фильтра представлены в табл. 3.

Таблица 3

Относительные чувствительности параметров ФВЧ 2-го порядка
к изменению номиналов элементов

Тип фильтра	Параметр	Чувствительность к изменению номинала элементов					
		$R1$	$R2$	$C1$	$C2$	$C3$	C
Все	K_u	0	0	1	-1	0	---
Баттерворта	ω_c	-0,5	-0,5	0	-0,5	-0,5	---
Чебышева							0,5
Баттерворта	TW	0	0	0	0	0	---
Чебышева		См. рис. 4					

Примечание: C – коэффициент передаточной функции ФВЧ

Относительная ширина переходной области [3]: $TW = \frac{1}{1 + \frac{1}{TW_n}}$, где TW_n – относитель-

ная (нормированная) ширина переходной области ФНЧ прототипа. Чувствительности ширины переходной области проиллюстрированы на рис. 4.

Из приведённых данных видно, что исследованные схемы фильтров чувствительны к номиналам элементов их схем. Чувствительности отличаются постоянным характером – не зависят от номиналов элементов. Максимальная чувствительность (100 %) наблюдается у коэффициентов усиления всех рассмотренных схем. У фильтров 1-го порядка чувствительностью 100 % также характеризуются частоты среза. Частоты среза фильтров 2-го порядка в два раза менее чувствительны к номиналам элементов, но, учитывая, что количество элементов у этих схем в два раза больше, суммарная чувствительность остаётся такой же, как и для схем 1-го порядка. Относительная ширина переходной области схем фильтров с монотонной АЧХ не чувствительна к изменению номиналов элементов.

Относительная ширина переходной области фильтров с характеристикой Чебышева чувствительна к неравномерности АЧХ в полосе пропускания и имеет достаточно сложное аналитическое описание. Чувствительность относительной ширины переходной области возрастает с увеличением неравномерности АЧХ и уменьшением минимального затухания в полосе задерживания. Приемлемые значения чувствительности соответствуют неравномерно-

сти АЧХ не более 1 дБ и минимальному ослаблению сигнала в полосе задерживания не менее 30 дБ.

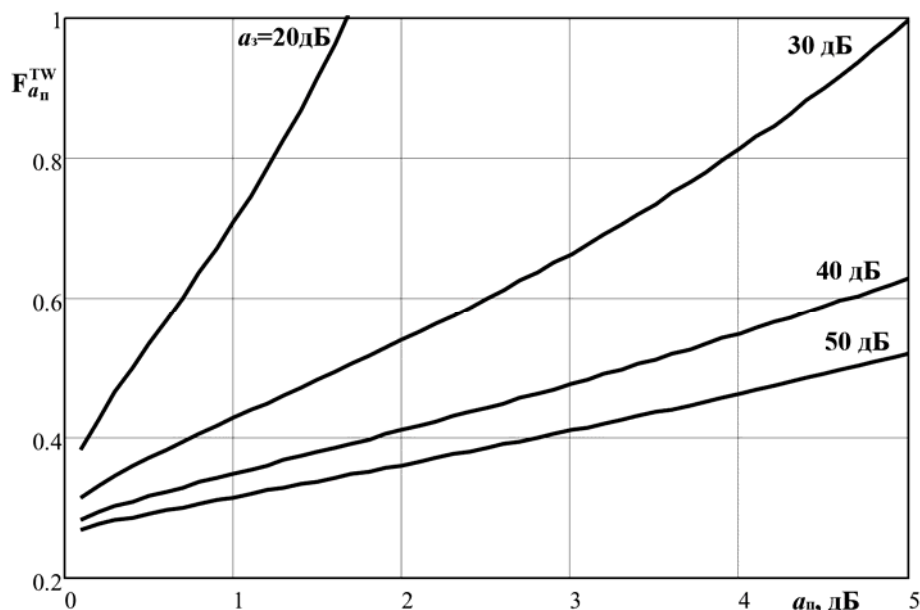


Рис. 4. Зависимость относительной чувствительности ширины переходной области от неравномерности АЧХ в полосе пропускания ФВЧ Чебышева 2-го порядка при различных значения минимального затухания АЧХ в полосе задерживания

Приведённые рассуждения справедливы для отдельного анализа чувствительностей параметров схем к номиналам их элементов и выявляют элементы, оказывающие максимальное воздействие на параметры схемы, и, следовательно, требующие применение более жёстких мер по обеспечению стабильности параметров. В реальных схемах под воздействием различных внешних факторов происходит одновременное изменение номиналов всех элементов схемы, поэтому необходимо анализировать комплексную чувствительность параметров схемы к изменению условий работы её элементов. Так как наибольшее влияние на параметры радиоэлементов оказывает температура, то наибольший практический интерес представляет анализ чувствительности параметров схемы к изменению температуры окружающей среды.

Суммарное относительное изменение параметра схемы можно рассчитать в соответствии с принципом суперпозиции: $\frac{dF}{F} = \sum_{i=1}^n S_{x_i}^F \cdot \frac{dx_i}{x_i}$, где $\frac{dx_i}{x_i}$ – относительное изменение номинала i -го элемента схемы; $S_{x_i}^F$ – относительная чувствительность параметра F к изменению номинала элемента x_i ; n – количество элементов схемы. Относительное изменение номиналов элементов, обусловленное изменением температуры, зависит от температурных коэффициентов ёмкости (ТКЕ) и сопротивления (ТКС) элементов: $\frac{dR}{R} = dT \cdot TKS$; $\frac{dC}{C} = dT \cdot TKE$; где dT – изменение температуры.

Если в схеме используются элементы одного типа (с одинаковыми ТКС и ТКЕ), то выражения для комплексных погрешностей схем к изменению температуры преобразуются до следующих видов. Для ФНЧ 1-го порядка: $\frac{dK_u}{K_u} = -1 \cdot dT \cdot TKS + 1 \cdot dT \cdot TKS + 0 \cdot dT \cdot TKE = 0$; аналогично $\frac{df_c}{f_c} = -(TKS + TKE) \cdot dT$; $\frac{dT_W}{T_W} = 0$. Для ФВЧ 1-го порядка: $\frac{dK_u}{K_u} = 0$;



$\frac{df_c}{f_c} = -(TKC + TKE) \cdot dT$; $\frac{dT_W}{T_W} = 0$. Для ФНЧ и ФВЧ 2-го порядка: $\frac{dK_u}{K_u} = 0$,

$\frac{df_c}{f_c} = -(TKC + TKE) \cdot dT$. Анализ температурной погрешности ширины переходной области

фильтров 2-го порядка с характеристикой Чебышева в аналитическом виде затруднителен в связи со сложным выражением этой погрешности. Расчёт этой погрешности необходимо производить для конкретной схемы с использованием численных методов.

Температурные коэффициенты для большинства широко распространённых радиоэлементов не превышают 0,2%/К, поэтому при изменении температуры на ± 40 °С относительные изменения параметров фильтров будут следующими: $\frac{dK_u}{K_u} = 0$, $\frac{dT_W}{T_W} = 0$ (кроме

фильтров 2-го порядка с характеристикой Чебышева); $\frac{df_c}{f_c} = \pm 16\%$. То есть применение эле-

ментов одно типа обеспечивает полную компенсацию температурной погрешности коэффициента усиления и ширины переходной области, но обуславливает значительную погрешность частоты среза.

Анализ выражений для температурных погрешностей показывает, что полностью компенсировать погрешность частоты среза можно за счёт применения резисторов и конденсаторов с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку температурными коэффициентами: $TKE = -TKC$. При этом температурная погрешность частоты среза будет равна нулю.

Основные выводы

Анализ чувствительности параметров схем к изменению номиналов их элементов является необходимым этапом проектирования схем и позволяет не только определить требования к точности подбора номиналов элементов и необходимость применения специальных мер по их стабилизации, но и стабилизировать параметры схемы при изменении условий окружающей среды без использования специальных мер путём эффективного подбора типов пассивных элементов.

У схем активных фильтров с многопетлевой отрицательной обратной связью (схемы Рауха) к изменению номиналов элементов чувствительны все исследованные параметры за исключением относительной ширины переходной области фильтров с монотонной АЧХ. При этом чувствительности схем 2-го порядка в среднем в два раза ниже по сравнению со схемами 1-го порядка, но количество элементов у схем 2-го порядка больше.

Температурная чувствительность параметров фильтров полностью нивелируется при использовании пассивных элементов с одинаковыми по величине, но разными по знаку температурными коэффициентами сопротивления и ёмкости.

Анализ чувствительностей параметров фильтров высоких порядков и с относительно сложной передаточной функцией в аналитическом виде затруднён. В связи с чем наибольший практический интерес представляет анализ чувствительностей параметров конкретных схем с применением численных методов решений и статистического метода Монте-Карло.

Вызывает интерес анализ чувствительностей других широко используемых схем активных фильтров с целью решения вопроса выбора оптимальных схем и разработки требований к выбору их элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джонсон, Д. Справочник по активным фильтрам / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
2. Мошиц, Г. Проектирование активных фильтров / Г. Мошиц, П. Хорн. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
3. Расчёт активных фильтров: учеб. пособие / А. В. Фролов, В. В. Лановенко, В. А. Чекалов [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2011. – 131 с.
4. Христич, В. В. Справочник по расчёту низкочувствительных активных фильтров / В. В. Христич. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2005. – 348 с.

Степанов А. Н., Степанова И. П.
A. N. Stepanov, I. P. Stepanova

РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

CALCULATION OF THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF AN ELECTRICAL MACHINE



Степанов Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, декан ЭТФ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Mr. Anatoly N. Stepanov – PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the Electro-Technical Faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru



Степанова Ирина Павловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Ms. Irina P. Stepanova – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Health&Safety, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель, позволяющая достаточно просто проводить оценку электромагнитного загрязнения от трехфазных электрических машин с учетом числа пар полюсов.

Summary. The paper considers a mathematical model simple enough to be able to evaluate the electromagnetic pollution of three-phase electrical machines based on the number of pole pairs.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитное поле, электромагнитное загрязнение, моделирование, расчет.

Key words: electrical machine, magnetic field, electromagnetic pollution, simulation, calculation.

УДК 504.75.05

В случае, когда целью расчета внешнего электромагнитного поля различных приборов (в том числе и тех, основными источниками в которых служат электрические машины) является оценка электромагнитного загрязнения и степень воздействия на человека, используют различные упрощенные математические модели [1].

При этом, как известно [2], скорость изменения поля в зависимости от расстояния до источника существенным образом зависит от числа пар полюсов источника, а с увеличением числа пар полюсов в значительной мере усложняется математическая модель источника. Кроме этого, при моделировании каждой фазы источника сосредоточенными проводниками модуль напряженности магнитного поля вдоль угловой координаты для двухполюсной машины распределяется несколько неравномерно [3] (см. рис. 1, кривая 1).

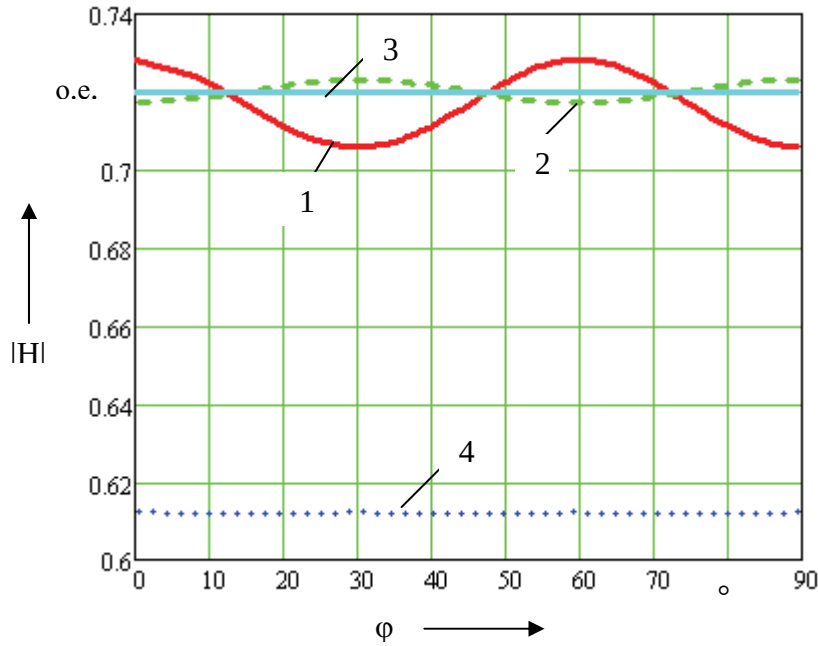


Рис. 1

Для уменьшения данной неравномерности в работе рассмотрена модель (см. рис. 2), в которой проводники каждой фазы распределены в 60-градусном секторе. В этом случае расчет векторного потенциала и модуля напряженности магнитного поля для любой точки К производился следующим образом:

$$A(x,y) = \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \right) \left\{ \dot{I}_A \cdot \ln \left[\frac{r_{A1}r_{B1}r_{Y4}r_{C4}r_{Z1}}{r_{A3}r_{Y2}r_{B3}r_{C2}r_{Z3}} \right] + \dot{I}_B \cdot \ln \left[\frac{r_{A2}r_{X2}r_{B2}r_{Z2}r_{C2}}{r_{A4}r_{X4}r_{B4}r_{Z4}r_{C4}} \right] + \dot{I}_C \cdot \ln \left[\frac{r_{X3}r_{A4}r_{B3}r_{Y3}r_{C3}}{r_{X1}r_{A2}r_{B1}r_{Y1}r_{C1}} \right] \right\}.$$

Здесь $\dot{I}_A$ – комплекс тока фазы А; $\dot{I}_B = \dot{I}_A \cdot e^{-j2\pi/3}$ – комплекс тока фазы В; $\dot{I}_C = \dot{I}_A \cdot e^{j2\pi/3}$ – комплекс тока фазы С.

Расстояния от соответствующего провода (рис. 2) до произвольной точки К в этом случае определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} r_{A1} &= \sqrt{(x - 0.5b)^2 + y^2}; \quad r_{X1} = \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2}; \\ r_{A2} &= \sqrt{(y + 0.5b)^2 + x^2}; \quad r_{X2} = \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2}; \\ r_{A3} &= \sqrt{(x + 0.5b)^2 + y^2}; \quad r_{X3} = \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2}; \\ r_{A4} &= \sqrt{(y - 0.5b)^2 + x^2}; \quad r_{X4} = \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/4))^2}; \\ r_{B1} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2}; \\ r_{Y1} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2 + (y + 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2}; \\ r_{B2} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2}; \\ r_{Y2} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2}; \\ r_{B3} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_{Y3} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2 + (y - 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2}; \\
 r_{B4} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2}; \\
 r_{Y4} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2}; \\
 r_{Z1} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2}; \\
 r_{C1} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2}; \\
 r_{Z2} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2 + (y + 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2}; \\
 r_{C2} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2 + (y + 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2}; \\
 r_{Z3} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2}; \\
 r_{C3} &= \sqrt{(x + 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2}; \\
 r_{Z4} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/12))^2 + (y - 0.5b \cdot \cos(\pi/12))^2}; \\
 r_{C4} &= \sqrt{(x - 0.5b \cdot \sin(\pi/3))^2 + (y - 0.5b \cdot \sin(\pi/6))^2}.
 \end{aligned}$$

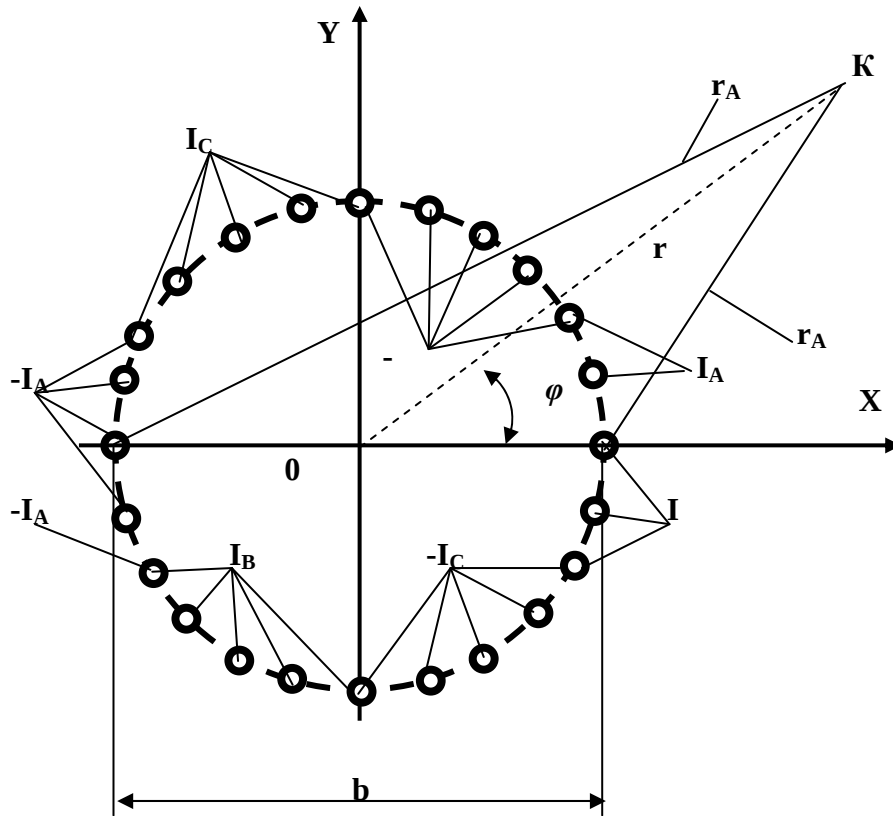


Рис. 2

Отдельные составляющие напряженности магнитного поля и модуль напряженности магнитного поля определяются по следующим выражениям:

$$H_x(x, y) = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial y} [A(x, y)]; \quad H_y(x, y) = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} [A(x, y)]; \quad (1)$$

$$H(x, y) = \sqrt{|H_x(x, y)|^2 + |H_y(x, y)|^2}. \quad (2)$$

Распределение модуля напряженности магнитного поля вдоль угловой координаты показано в относительных единицах на рис. 1 (кривая 2). Как видно из рисунка, изменение напряженности поля существенно уменьшается, хотя сам расчет усложняется. Здесь следует отметить, что с увеличением числа пар полюсов неравномерность в распределении практически отсутствует. Так, на рис. 1 (кривая 4) представлено распределение модуля напряженности магнитного поля вдоль угловой координаты для 4-полюсной машины, которое является фактически постоянным. Однако, как было сказано выше, при использовании моделей, в которых обмотки представляются в виде сосредоточенных проводников с токами, с увеличением пар полюсов расчеты существенным образом усложняются.

Поэтому в данной работе предложена математическая модель, которая достаточно просто учитывает число пар полюсов и позволяет получить компактное выражение для напряженности магнитного поля. Модель представляет собой бесконечно длинный цилиндр (см. рис. 3), магнитная проницаемость которого $\mu = \infty$ и на поверхности которого расположен бесконечно тонкий токовый слой с комплексным значением линейной токовой нагрузки $\dot{A}_s$, изменяющейся по закону:

$$\dot{A}_s = \dot{A}_{s_m} \sin(p\varphi),$$

где $\dot{A}_{s_m}$ – комплексная амплитуда линейной токовой нагрузки; p – число пар полюсов; φ – угловая координата.

В этом случае уравнение, характеризующее электромагнитное поле, имеет плоско-параллельный характер и его удобно представлять также в терминах векторного магнитного потенциала, поскольку векторный потенциал в такой постановке имеет одну составляющую, направленную вдоль оси OZ , которая так же, как и линейная нагрузка, изменяется по гармоническому закону:

$$\dot{A}_z = \dot{A}_{zm} \sin(p\varphi).$$

Здесь $\dot{A}_{zm}$ – комплексная амплитуда осевой составляющей векторного потенциала.

Уравнение электромагнитного поля при таких условиях в цилиндрической системе координат имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{A}_{zm}}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} p^2 \dot{A}_{zm} = 0.$$

В качестве граничных условий приняты условия:

$$\dot{H}_\varphi \Big|_{r=R} = \dot{A}_{s_m} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_{zm}}{\partial r} \Big|_{r=R}; \quad \dot{A}_{zm} \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0.$$

Решение данной краевой задачи будем искать в следующем виде:

$$\dot{A}_{zm} = C / r^p,$$

где C – постоянная интегрирования, которая определяется с помощью первого краевого условия.

Подставив данную функцию в исходное дифференциальное уравнение, можно легко убедиться, что она обращает его в тождество, то есть действительно является решением.

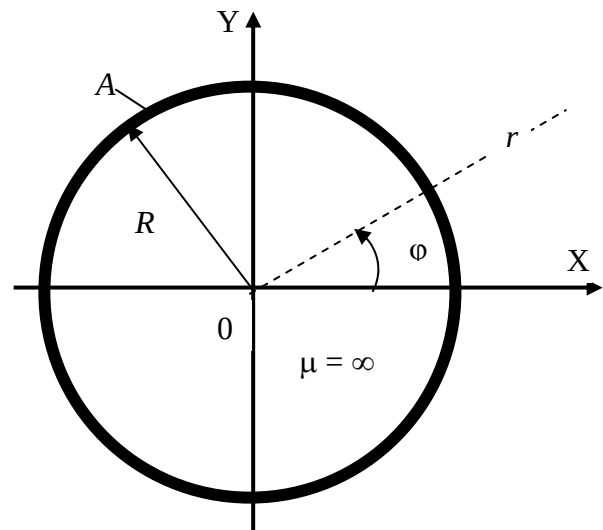


Рис. 3

Отдельные составляющие напряженности магнитного поля и модуль напряженности магнитного поля определяются с помощью следующих выражений:

$$\dot{H}_{\varphi} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{A}_{zm}}{\partial r} \sin(p\varphi) = \frac{C \cdot p}{\mu_0 r^{(p+1)}} \sin(p\varphi); \dot{H}_r = \frac{p}{r \cdot \mu_0} \dot{A}_{zm} \cos(p\varphi) = \frac{C \cdot p}{\mu_0 r^{(p+1)}} \cos(p\varphi);$$

$$|\dot{H}| = \sqrt{|\dot{H}_{\varphi}|^2 + |\dot{H}_r|^2} = \frac{C \cdot p}{\mu_0 r^{(p+1)}}. \quad (3)$$

Выражение для напряженности магнитного поля в относительных единицах, в случае если за базисное значение напряженности магнитного поля принять ее значение при $r = R_0$, принимает следующий вид:

$$|H(p, r)| = \left(\frac{R_0}{r} \right)^{(p+1)}. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) видно, что модуль напряженности магнитного поля не зависит от угловой координаты (см. рис. 1, кривая 3).

Для проверки правильности полученного выражения магнитного поля в работе проведен расчет магнитного поля от сосредоточенных проводов с токами (см. рис. 2), при условии, что ток в проводах изменяется по синусоидальному закону в зависимости от угловой координаты φ .

В этом случае расчет векторного магнитного потенциала для любой точки К производился следующим образом:

$$A(x, y) = A1(x, y) + A2(x, y) + A3(x, y) + A4(x, y),$$

где

$$A1(x, y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{\pi}{12}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{Y4}}{r_{Y2}} \right] + \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{C4}}{r_{C2}} \right] + \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{X4}}{r_{X2}} \right] \right);$$

$$A2(x, y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{B4}}{r_{B2}} \right] + \sin\left(\frac{5\pi}{12}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{Z4}}{r_{Z2}} \right] + \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{A4}}{r_{A2}} \right] \right);$$

$$A3(x, y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{7\pi}{12}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{Y3}}{r_{Y1}} \right] + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{C3}}{r_{C1}} \right] + \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{X3}}{r_{X1}} \right] \right);$$

$$A4(x, y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{B3}}{r_{B1}} \right] + \sin\left(\frac{11\pi}{12}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{Z3}}{r_{Z1}} \right] \right);$$

Отдельные составляющие напряженности магнитного поля и модуль напряженности магнитного поля определяются по тем же выражениям (1) и (2), которые применялись для машины с распределенной обмоткой.

Распределение модуля напряженности магнитного поля вдоль угловой координаты показано на рис. 1 (кривая 3), т.е. оно полностью совпадает с предыдущим случаем.

В работе рассмотрен и еще один случай, когда поле создается двумя обмотками, сдвинутыми в пространстве на угол 90° и с токами в каждой обмотке, распределенными по углу по синусоидальному закону и сдвинутыми по фазе также на угол 90° .

В этом случае расчет векторного магнитного потенциала для любой точки К производился следующим образом:

$$A(x, y) = A1(x, y) + A2(x, y) + A3(x, y) + A4(x, y) +$$

$$+ A5(x, y) + A6(x, y) + A7(x, y) + A8(x, y),$$

где

$$A5(x, y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0 j}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{\pi}{12}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{Y1}}{r_{Y3}} \right] + \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{C1}}{r_{C3}} \right] + \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \ln \left[\frac{r_{X1}}{r_{X3}} \right] \right);$$

$$A6(x,y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0 j}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{B1}}{r_{B3}}\right] + \sin\left(\frac{5\pi}{12}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{Z1}}{r_{Z3}}\right] + \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{A1}}{r_{A3}}\right] \right);$$

$$A7(x,y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0 j}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{7\pi}{12}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{Y4}}{r_{Y2}}\right] + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{C4}}{r_{C2}}\right] + \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{X4}}{r_{X2}}\right] \right);$$

$$A8(x,y) = \left(\frac{\dot{I}_0 \mu_0 j}{2\pi} \right) \left(\sin\left(\frac{5\pi}{6}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{B4}}{r_{B2}}\right] + \sin\left(\frac{11\pi}{12}\right) \cdot \ln\left[\frac{r_{Z4}}{r_{Z2}}\right] \right).$$

В этом случае распределение напряженности магнитного поля в относительных единицах оказывается полностью аналогичным распределению напряженности, полученному в двух последних случаях.

На рис. 4 представлено изменение модуля напряженности магнитного поля в относительных единицах вдоль радиуса для разных моделей.

Так, на кривой 1 показано распределения модуля напряженности трехфазной двух полюсной обмотки, каждая фаза которой представлялась сосредоточенными проводниками с токами. На кривой 2 показано распределения модуля напряженности той же обмотки, но с распределенными проводниками.

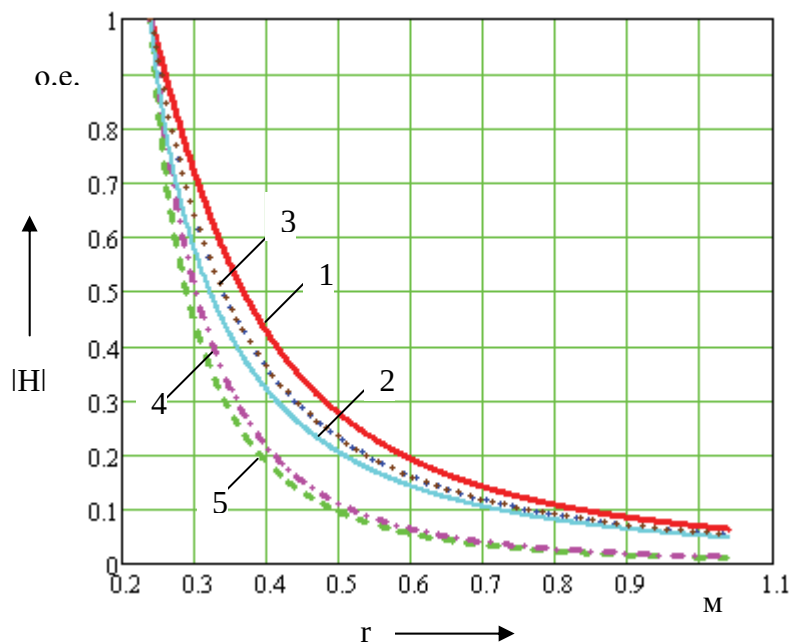


Рис. 4

Кривая 3 показывает распределение модуля напряженности той же обмотки, но с магнитного поля, определенное по формуле (4) и по формуле (2) для двух последних вариантов. На этом же рисунке показано распределение модуля напряженности магнитного поля, определенное по формуле (4) (кривая 4) и формуле (2) (кривая 5) для 4-полюсной машины.

Причем за базисное значение напряженности для всех моделей принималось ее значение, определенное при $r = R_0 = 0,24$ м.

Как видно из рис. 4, все три последние модели дают аналогичные результаты.

На рис. 5 показаны графики изменения модулей напряженности поля, определенные по выражению (4) для различного числа пар полюсов (кривая 1 – $p = 1$, кривая 2 – $p = 2$, кривая 3 – $p = 3$, кривая 4 – $p = 4$, кривая 5 – $p = 5$, кривая 6 – $p = 6$). Как видно из рис. 5, скорость затухания поля с увеличением числа пар полюсов растет.

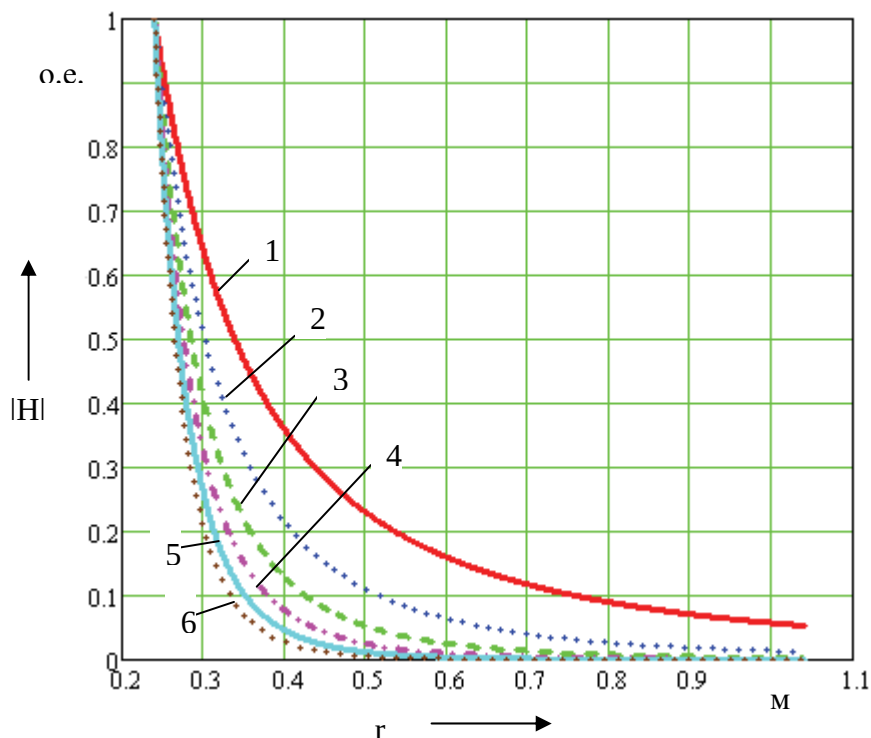


Рис. 5

В заключение можно сделать вывод о том, что выражение (4) дает достаточно точные результаты. Его удобно использовать для оценки электромагнитного загрязнения от источников с вращающимися магнитными полями, для чего полученные тем или иным способом (например, с помощью непосредственных измерений) значения напряженностей магнитного поля на поверхности машины необходимо умножить на функцию (4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, А. Н. Анализ эквивалентных источников внешнего магнитного поля электрических машин. / А. Н. Степанов // Международный симпозиум «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы»: материалы междунар. науч.-техн. конф. «Электротехнические комплексы и системы» (Комсомольск-на-Амуре, 21-22 октября 2010 г.): В 5 т. Т 3. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 248-254.
2. Степанов, А. Н. Расчет внешнего вращающегося магнитного поля бытовых приборов / А.Н. Степанов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике № I-1(1), 2010. – С. 25-30.
3. Степанов, А. Н. Расчет внешнего магнитного поля трехфазной системы / А. Н. Степанов // Дальневосточная весна – 2010: материалы 10-й междунар. науч.-практ. конф. в области экологии и безопасности жизнедеятельности (Комсомольск-на-Амуре, 20-21 мая 2010 г.). – Комсомольск-на-Амуре, ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 35-45.

Горелик В. А., Золотова Т. В., Прохорова М. С.

V. A. Gorelik, T. V. Zolotova, M. S. Prokhorova

ДИНАМИЧЕСКАЯ МИНИМАКСНАЯ ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ

THE DYNAMIC MINIMAX TASK OF RISK MANAGEMENT



Горелик Виктор Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН (Россия, Москва); 123001, г. Москва, ул. Спиридоновка, д. 16, кв. 26; (495) 6901164. E-mail: vgor16@mail.ru.

Mr. Victor A. Gorelik – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Senior Researcher, A.A. Dorodnitsyn Computer Center, Russian Academy of Science (Russia, Moscow); 123061, Moscow, 16 Spiridonovka St., apt. 26; (495) 6901164. E-mail: vgor16@mail.ru.



Золотова Татьяна Валерьяновна – доктор физико-математических наук, доцент, профессор Государственного университета Министерства Финансов РФ (Россия, Москва); 127006, г. Москва, Настасьинский пер., д. 3, корп. 2; (916) 9563529. E-mail: tgold11@mail.ru.

Ms. Tatyana V. Zolotova – Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor of the State University of the Ministry of Finance of the Russian Federation (Russia, Moscow); 127006, Moscow, 3/2 Nastscinsk Lane; (916) 9563529. Email: tgold11@mail.ru.



Прохорова Мария Сергеевна – студентка факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, д. 71, корп. 2, кв. 8; (4217) 530141. E-mail: prokhorova.ms@yandex.ru.

Ms Maria S. Prokhorova - student of the Faculty of Computer Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681024, Komsomolsk-on-Amur, 71/2 Komsomolskaya St., apt.8; (4217) 530141. E-mail: prokhorova.ms@yandex.ru.

Аннотация. В настоящей статье представлена непрерывная динамическая модель управления риском в сложной системе, состоящей из независимых друг от друга подсистем. В качестве оценки риска функционирования системы рассматривается максимальная функция риска, определяющая наиболее рискованные подсистемы. Критерием эффективности системы считается суммарная эффективность по всем подсистемам. Принцип оптимального управления основывается на свертке критериев эффективности и риска системы. Рассмотрен пример линейной динамической задачи управления риском.

Summary. The paper considers a continuous dynamic model of risk management in a complex system consisting of independent subsystems. As an estimation of the system functioning risk, the maximal risk function, which defines the most risky subsystems, is considered. The system performance criterion is the total efficiency across all subsystems. The optimum control principle is here based on the convolution of performance criteria and of the system risk. An example of a linear dynamic task of risk management is considered.

Ключевые слова: функция риска, свертка критериев, минимакс, функция Гамильтона, принцип максимума, оптимальное управление, траектория системы.

Key words: risk function, convolution of criteria, minimax, Hamiltonian function, maximum principle, optimum control, trajectory of a system.

Введение

Общими чертами модели управления деятельностью любой сложной системы в условиях неполной информации, а значит в условиях риска, являются стремления к увеличению эффективности и одновременно снижению риска. Соответственно общая модель управления должна включать две подмодели: модель оценки эффективности системы и модель оценки риска ее функционирования. Основными компонентами обеих моделей являются описание процессов функционирования системы, т.е. изменение фазового состояния под влиянием внутренних и внешних воздействий, описание процедур управления (схема управления, вид управления, ограничения), описание внешнего воздействия на систему, описание информационных процессов в системе.

Близкие по постановке задач вопросы в рамках теории управления организационными системами освещались в работах [1; 5].

Считая, что оценки эффективности и риска в некоторой системе представляют собой функционалы с областями значений на числовой оси, рассмотрим непрерывную динамическую постановку задачи управления риском, где процедурой выбора решений в двухкритериальной задаче является линейная свертка критериев эффективности и риска. При этом для определения понятия оптимального управления в системе в работе используется функция риска в метрике l_∞ (например, [3; 4]), зависящая в любой момент времени от фазового состояния системы и управления.

Общая постановка непрерывной минимаксной динамической задачи управления риском и необходимые условия оптимальности

Пусть сложная система состоит из n подсистем. Будем считать, что каждая из подсистем не влияет на деятельность любой другой подсистемы, коэффициенты корреляции между стохастическими параметрами процессов в любых двух подсистемах равны нулю, вероятность возникновения более одного неблагоприятного события в системе мала (близка к нулю). Рассматривается интервал функционирования системы $[0, T]$, управление на котором задается векторной функцией $u(\cdot)$ произвольной размерности (функцию в целом будем обозначать $u(\cdot)$ в отличие от ее значения $u(t)$ в момент t). В фиксированный момент времени состояние системы описывается вектором фазовых переменных x , а процесс функционирования системы на отрезке $[0, T]$ описывается векторной функцией $x(\cdot)$ – траекторией системы. Траектория системы однозначно определяется выбранным управлением.

Будем считать, что в фиксированный момент времени t эффективность i -й подсистемы определяется функцией $h_i(x_i(t), u(t), t)$. Разумное управление в такой системе, при котором ее функционирование может быть устойчивым, предполагает осуществлять оценку максимального ущерба от возникновения возможных неблагоприятных событий, приводящих к потерям, т.е. предполагает действовать по принципу осторожного поведения, выделяя наиболее рискованные подсистемы. Тогда для оценки риска всей системы вполне оправданно использовать функцию риска, определенную в метрике l_∞ :

$$R_\infty(x, u, t) = \max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i(t), u(t), t), \quad (1)$$

где $g_i(x_i(t), u(t), t)$ – некоторая функция риска для i -й подсистемы; $x_i(t)$ – траектория i -й подсистемы в пространстве фазовых переменных. Эта траектория, т.е. процесс функционирования подсистемы в соответствующем пространстве, описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_i = f_i(x_i(t), u(t), t) \quad (2)$$

с заданным начальным состоянием

$$x_i(0) = x_{0i}. \quad (3)$$

Таким образом, каждому управлению $u(\cdot)$ ставится в соответствие пучок траекторий $\bar{x}(\cdot) = (x_1(\cdot), \dots, x_n(\cdot))$. Оценку функционирования системы, состоящей из одной (i -й) подсистемы на всем отрезке времени $[0, T]$, зададим следующим интегральным критерием

$$F_i(u(\cdot)) = \int_0^T [h_i(x_i(t), u(t), t) - g_i(x_i(t), u(t), t)] dt, \quad (4)$$

где $x_i(\cdot)$ определяется при данном $u(\cdot)$ из (2), (3).

Критерий функционирования системы, состоящей из n подсистем, на отрезке времени $[0, T]$ в предположении аддитивности эффективности и гарантированной оценки риска (1) представляет собой интегральный функционал

$$J(u(\cdot)) = \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n h_i(x_i(t), u(t), t) - \max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i(t), u(t), t) \right] dt, \quad (5)$$

где $x_i(\cdot)$ также определяется при данном $u(\cdot)$ из (2), (3).

Рассмотрим задачу максимизации функционала (5) при дифференциальных связях (2) с начальными условиями (3). В качестве допустимых управлений будем рассматривать измеримые вектор-функции $u(\cdot)$ с интегрируемыми на $[0, T]$ квадратами каждой компоненты, т.е. из пространства $L_2[0, T]$, и со значениями из выпуклого компакта $U \subset R^r$ (R^r – r -мерное евклидово пространство). Таким образом, множество допустимых управлений есть $U = \{u(\cdot) \in L_2[0, T] \mid u(t) \in U \quad \forall t \in [0, T]\}$.

Пусть для любого допустимого управления $u(\cdot)$ и любого i выполнены условия существования и единственности абсолютно непрерывного решения системы уравнений (2) с начальными условиями (3) на отрезке $[0, T]$. Обозначим $W_2^{(1)}[0, T]$ пространство абсолютно непрерывных вектор-функций с производными из $L_2[0, T]$. Введем $\bar{x}_0 = (x_{01}, \dots, x_{0n})$ и множество функций $X = \{\bar{x}(\cdot) \in W_2^{(1)}[0, T] \mid \bar{x}(t) \in R^k, \quad \bar{x}(0) = \bar{x}_0\}$.

Теорема. Пусть функции $f_i(x, u, t)$ непрерывны по (x, u) , дифференцируемы по x , линейны по u , измеримы по t , удовлетворяют условию Липшица по x и условию

$$|\langle x, f_i(x, u, t) \rangle| \leq d_i(1 + |x|^2); \quad (6)$$

функции $h_i(x, u, t)$ и $g_i(x, u, t)$ ограничены сверху на $R^{k_i} \times U \times [0, T]$, дифференцируемы по x , линейны по u и удовлетворяют условию Липшица по x ; U – выпуклый компакт в R^r . Тогда существует оптимальное управление $u^0(\cdot)$ в задаче максимизации (5), (2), (3), соответствующие ему траектории $x_i^0(\cdot)$, определенные (2), (3), неотрицательные скалярные измеримые функции $p_i(\cdot)$, $i = 1, \dots, n$, $\sum_{i=1}^n p_i(t) \equiv 1$, $p_i(t) = 0$ при $i \notin I(t) = \text{Arg max}_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i(t), u(t), t)$ и вектор-функции $\psi_i^0(\cdot)$, удовлетворяющие уравнениям

$$\dot{\psi}_i^0(t) = -\frac{\partial}{\partial x} f_i(x_i^0(t), u^0(t), t) \psi_i^0(t) - \frac{\partial}{\partial x} h_i(x_i^0(t), u^0(t), t) + p_i(t) \frac{\partial}{\partial x} g_i(x_i^0(t), u^0(t), t), \quad (7)$$

$$\psi_i^0(T) = 0,$$

такие, что функция Гамильтона

$$H(\bar{x}^0(t), u, t, \bar{\psi}^0(t), \bar{p}(t)) = \sum_{i=1}^n [f_i(x_i^0(t), u, t) \psi_i^0(t) + h_i(x_i^0(t), u, t) - p_i(t) g_i(x_i^0(t), u, t)] \quad (8)$$

достигает максимума по $u \in U$ на управлении $u^0(t)$ при почти всех $t \in [0, T]$.

Доказательство. Определим штрафной функционал

$$\Phi(\bar{x}(\cdot), u(\cdot)) = - \sum_{i=1}^n \int_0^T |\dot{x}_i(t) - f_i(x_i(t), u(t), t)|^2 dt. \quad (9)$$

Введем вспомогательную задачу с использованием штрафного функционала (9):

$$\hat{W}(C) = \sup_{\substack{u(\cdot) \in U, \\ \bar{x}(\cdot) \in X, \\ v(\cdot) \in V}} W(\bar{x}(\cdot), u(\cdot), v(\cdot), C), \quad (10)$$

где V – пространство непрерывных на $[0, T]$ скалярных функций,

$$W(\bar{x}(\cdot), u(\cdot), v(\cdot), C) = \int_0^T \{v(t) - C \sum_{i=1}^n [\min\{0, (\sum_{i=1}^n h_i(x_i(t), u(t), t)) - g_i(x_i(t), u(t), t) - v(t)\}]^2\} dt + C\Phi(\bar{x}(\cdot), u(\cdot)). \quad (11)$$

Покажем, что задача (10), (11) имеет решение (при любом $C > 0$) и имеет место соотношение

$$\begin{aligned} J_0 &= \lim_{C \rightarrow \infty} \hat{W}(C) = \lim_{C \rightarrow \infty} \int_0^T v^0(t, C) dt = \\ &= \lim_{C \rightarrow \infty} \int_0^T [\sum_{i=1}^n h_i(\hat{x}_i(t, C), u^0(t, C), t) - \max_{1 \leq i \leq n} g_i(\hat{x}_i(t, C), u^0(t, C), t)] dt, \end{aligned} \quad (12)$$

где J_0 – максимальное значение функционала (5); $u^0(\cdot, C)$, $v^0(\cdot, C)$ – решение задачи (10), (11); $\hat{x}_i(t, C)$ – решение системы уравнений (2) при начальном условии (3) и $u(t) = u^0(t, C)$.

Из линейности по u функций $f_i(x, u, t)$, $h_i(x, u, t)$ и $g_i(x, u, t)$ следует, что функционалы $F_i(u(\cdot))$ и $\Phi(\bar{x}(\cdot), u(\cdot))$ слабо непрерывны по $u(\cdot) \forall x \in W_2^{(1)}[0, T]$. Условия теоремы достаточны для существования и единственности абсолютно непрерывного решения системы уравнений (2) с начальным условием (3) (при любом i и $u(\cdot) \in U$). Множество допустимых управлений U является компактом в слабой топологии, функционал в исходной задаче слабо непрерывен, следовательно эта задача имеет решение.

Пусть $\{\bar{x}_m(\cdot, C), u_m(\cdot, C)\}$ – максимизирующая последовательность вспомогательной задачи (при фиксированном $C > 0$). Так как U – компакт в слабой топологии, то из $\{u_m(\cdot, C)\}$ можно выделить подпоследовательность, слабо сходящуюся к $u^0(\cdot, C) \in U$. Из непрерывности f_i , ограниченности $h_i(x, u, t)$ и $g_i(x, u, t)$ и условия (6), применяя лемму Гронуолла [2], получаем, что последовательность $\{\bar{x}_m(\cdot, C)\}$ равномерно ограничена и равномерно непрерывна. Следовательно, из нее можно выделить подпоследовательность, равномерно на $[0, T]$ сходящуюся к функции $\bar{x}^0(\cdot, C)$, из этой последовательности – новую подпоследовательность, для которой $\dot{\bar{x}}_{m_k}(\cdot, C) \rightarrow y(\cdot, C)$ слабо в $L_2[0, T]$. Значит, $\bar{x}^0(\cdot, C)$ абсолютно непрерывна и $\dot{\bar{x}}^0(\cdot, C) = y(\cdot, C)$ почти всюду. Из слабой непрерывности функционалов $F_i(u(\cdot))$ и $\Phi(\bar{x}(\cdot), u(\cdot))$ следует, что пара $(\bar{x}^0(\cdot, C), u^0(\cdot, C))$ является решением вспомогательной задачи (10), (11). Для этого решения существует последовательность $C_k \rightarrow \infty$, такая, что $u^0(\cdot, C_k) \rightarrow u^0(\cdot)$ почти всюду и $\bar{x}^0(\cdot, C_k) \rightarrow \bar{x}^0(\cdot)$ равномерно на $[0, T]$.

Рассмотрим вариацию функционала (11) по $v(\cdot)$:

$$\delta_{v(\cdot)} W = \int_0^T \bar{v}(t) \{1 + 2C \sum_{i=1}^n [\min\{0, (\sum_{i=1}^n h_i(x_i(t), u(t), t)) - g_i(x_i(t), u(t), t) - v(t)\}]\} dt,$$

где $\bar{v}(t)$ – произвольная непрерывная на $[0, T]$ функция.

Пусть $(\bar{x}^0(\cdot, C), u^0(\cdot, C), v^0(\cdot, C))$ – решение задачи (10), (11) при фиксированном $C > 0$. Из условия равенства вариации $\delta_{v(\cdot)} W$ нулю в точке решения $\forall \bar{v}(t)$ нетрудно получить неравенство

$$\frac{1}{2Cn} \leq v^0(t, C) - \left[\sum_{i=1}^n h_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) - \max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) \right] \leq \frac{1}{2C}. \quad (13)$$

Переходя к пределу в неравенстве (13) по $C_k \rightarrow \infty$, имеем

$$\sum_{i=1}^n h_i(x_i^0(t), u^0(t), t) - \max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i^0(t), u^0(t), t) \equiv v^0(t) \text{ на } [0, T].$$

Функция $\hat{W}(C)$ монотонно не возрастает по C и $\hat{W}(C) \geq J_0$, поэтому существует $\lim_{C \rightarrow \infty} \hat{W}(C) \geq J_0$. Отсюда $\Phi(\bar{x}^0(\cdot), u^0(\cdot)) = 0$, т.е. пара $(\bar{x}^0(\cdot), u^0(\cdot))$ удовлетворяет дифференциальным ограничениям (2), и

$$J_0 \leq \lim_{C \rightarrow \infty} \hat{W}(C) \leq \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n h_i(x_i^0(t), u^0(t), t) - \max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i^0(t), u^0(t), t) \right] dt \leq J_0,$$

т.е. имеет место равенство $\lim_{C \rightarrow \infty} \hat{W}(C) = J_0 = \int_0^T v^0(t) dt$.

Из условия Липшица для функций $h_i(x, u, t)$ и $g_i(x, u, t)$ по x с использованием леммы Гронуолла получаем соотношение

$$\lim_{C \rightarrow \infty} \int_0^T \left| \left(\sum_{i=1}^n h_i(\hat{x}_i(t, C), u^0(t, C), t) - g_i(\hat{x}_i(t, C), u^0(t, C), t) - \left(\sum_{i=1}^n h_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) - g_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) \right) \right) \right| dt = 0,$$

где $\hat{x}_i(\cdot, C)$ – решение системы уравнений (2) при $u(t) = u^0(t, C)$. С учетом существования пределов (из-за монотонности) соотношение (12) доказано.

Введем обозначения

$$p_i(t, C) = -2C \min\{0, (\sum_{i=1}^n h_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) - g_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) - v^0(t, C))\} \geq 0,$$

$$\psi_i(t, C) = 2C(\dot{x}_i^0(t, C) - f_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t)).$$

Вычисляя вариацию функционала (11) по $x_i(\cdot)$, интегрируя по частям и приравнявая ее к нулю (условие экстремума), имеем

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_i^0(t) &= -\frac{\partial}{\partial x} f_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) \psi_i^0(t, C) - \frac{\partial}{\partial x} h_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t) + \\ &+ p_i(t) \frac{\partial}{\partial x} g_i(x_i^0(t, C), u^0(t, C), t), \\ \psi_i^0(T) &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Приравнявая к нулю вычисленную ранее вариацию функционала (11) по $v(\cdot)$, имеем

$$\sum_{i=1}^n p_i(t, C) \equiv 1. \quad (15)$$

На допустимые управления наложены ограничения $u(t) \in U$, поэтому условие экстремума по $u(\cdot)$ функционала (11) есть неположительность его вариации по $u(\cdot)$ при любой допустимой вариации управления, что дает неравенство

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial u} H(\bar{x}^0(t, C), u^0(t, C), t, \bar{\psi}(t, C), \bar{p}(t, C)), u - u^0(t, C) \right\rangle \leq 0 \quad (16)$$

$\forall u \in U$ при почти всех $t \in [0, T]$, где

$$\begin{aligned} H(\bar{x}^0(t, C), u, t, \bar{\psi}(t, C), \bar{p}(t, C)) = \\ = \sum_{i=1}^n [f_i(x_i^0(t, C), u, t) \psi_i(t, C) + h_i(x_i^0(t, C), u, t) - p_i(t, C) g_i(x_i^0(t, C), u, t)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Переход к пределу в полученных соотношениях позволит получить все утверждения теоремы, но чтобы решение вспомогательной задачи сходилось к решению исходной задачи $(\bar{x}^0(\cdot), u^0(\cdot))$, используем следующий прием. Изменим функционал исходной задачи, взяв вместо (5)

$$\tilde{J}(u(\cdot)) = \int_0^T \left[\sum_{i=1}^n h_i(x_i(t), u(t), t) - \max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i(t), u(t), t) + |\bar{x}(t) - \bar{x}^0(t)|^2 + |u(t) - u^0(t)|^2 \right] dt. \quad (18)$$

Задача (18), (2), (3) имеет единственное решение $(\bar{x}^0(\cdot), u^0(\cdot))$. Вспомогательная задача для нее получается при подстановке в (11) нового функционала с дополнительными квадратичными членами. Пусть решение этой задачи есть по-прежнему $(\bar{x}^0(\cdot, C), u^0(\cdot, C), v^0(\cdot, C))$. Тогда в силу доказанного выше при $C \rightarrow \infty$ имеет место сильная сходимость (по норме L_2) $u^0(\cdot, C) \rightarrow u^0(\cdot)$ почти всюду и $x^0(\cdot, C) \rightarrow x^0(\cdot)$, а также

$$\lim_{C \rightarrow \infty} v^0(t, C) \equiv \sum_{i=1}^n h_i(x_i^0(t), u^0(t), t) - \max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i^0(t), u^0(t), t).$$

Квадратичные дополнительные члены не меняют вариаций на экстремальных решениях, т.к. они обращаются в нуль, поэтому условия (14)-(16) для вспомогательной задачи с функционалом (18) остаются в силе.

В силу (15) существует последовательность $C_m \rightarrow \infty$, такая, что $p_i(t, C_m) \rightarrow p_i(t) \quad \forall i$ почти всюду на $[0, T]$, причем в силу определения $p_i(t, C)$ имеем $p_i(t) \geq 0, \quad \forall t, \quad i = 1, \dots, n$, $\sum_{i=1}^n p_i(t) \equiv 1, \quad p_i(t) = 0$ при $i \notin I(t)$, где $I(t)$ определено в формулировке теоремы. Далее можно выбрать последовательность так, что $u^0(t, C_m) \rightarrow u^0(t)$ почти всюду на $[0, T]$, $\bar{x}^0(t, C_m) \rightarrow \bar{x}^0(t)$, $\psi_i(t, C_m) \rightarrow \psi_i^0(t)$ равномерно по $t \in [0, T]$ и из (14) получаем для $\psi_i^0(t)$ уравнения (7).

Из (16), (17) следует необходимое условие максимума функции Гамильтона (8) по $u \in U$ при почти всех $t \in [0, T]$, откуда в силу ее линейности по u получаем принцип максимума, сформулированный в теореме. Теорема доказана.

Замечание 1. В условиях теоремы можно ослабить условие линейности по u функций $f_i(x, u, t)$, $h_i(x, u, t)$ и $g_i(x, u, t)$, заменив его условием слабой полунепрерывности сверху функционалов $F_i(u(\cdot))$ и $\Phi(\bar{x}(\cdot), u(\cdot))$ по $u(\cdot) \quad \forall x \in W_2^{(1)}[0, T]$.

Замечание 2. Результат, сформулированный в теореме, представляет собой обобщение классического принципа максимума, превращаясь в него для тех моментов t , для которых $\max_{1 \leq i \leq n} g_i(x_i, u, t)$ достигается на одном индексе i_0 (в этом случае имеем $p_{i_0} = 1, \quad p_i = 0, \quad i \neq i_0$). Он может быть распространен на случаи наличия фазовых или терминальных ограничений, при этом в условия оптимальности добавляются соответствующие члены.

Замечание 3. Результаты, сформулированные в теореме (с очевидным изменением вида условия оптимальности), легко распространяются на случай, когда эффективность всей

системы не обладает свойством аддитивности, а описывается функционалом общего вида $h(x(t), u(t), t)$.

Линейная непрерывная динамическая модель управления риском

Пусть $u_i(t)$ – средства, вкладываемые в i -ю подсистему (развитие производства, управление проектами) в момент времени t , $i = 1, \dots, n$. Тогда $u(t) = (u_1(t), \dots, u_i(t), \dots, u_n(t))$ – распределение средств между подсистемами. Траектория системы представляет собой вектор $x(t) = (x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t))$, где $x_i(t)$ – скалярная величина, описывающая состояние i -й подсистемы в момент времени t (например, выпуск продукции). Процесс функционирования каждой подсистемы описывается обыкновенным дифференциальным уравнением с заданным начальным условием:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) - k_i x_i(t), \quad x_i(0) = x_{0i}, \quad (19)$$

где k_i означает издержки на единицу $x_i(t)$ (амортизация, аренда, налоги и др.).

Пусть эффективность функционирования подсистемы определяется критерием $h_i(x_i(t), u_i(t), t) = \pi_i x_i(t)$, где коэффициент π_i может быть, например, прибылью с единицы выпущенной продукции. При этом оценка риска есть функция $g_i(x_i(t), u_i(t), t) = a_i x_i(t)$, где a_i – математическое ожидание потерь с единицы $x_i(t)$ (например, потери прибыли в связи с возможным падением цен на продукцию). Критерий функционирования системы на всем отрезке $[0, T]$ имеет вид

$$\int_0^T [\sum_{i=1}^n \pi_i x_i(t) - \max_{1 \leq i \leq n} a_i x_i(t)] dt. \quad (20)$$

Найдем решение задачи максимизации (20) по $u(\cdot) \in U$,

$U = \{u(\cdot) | u_i(t) \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n u_i(t) = C, t \in [0, T]\}$ при условиях (19).

Функция Гамильтона (8) для данной модели имеет вид

$$H(\bar{x}^0(t), u, t, \bar{\psi}^0(t), \bar{p}(t)) = \sum_{i=1}^n [(u_i - k_i x_i^0(t)) \psi_i^0(t) + \pi_i x_i^0(t) - p_i(t) a_i x_i^0(t)].$$

Тогда уравнения (7) есть

$$\dot{\psi}_i^0(t) = k_i \psi_i^0(t) - (\pi_i - p_i(t) a_i), \quad \psi_i^0(T) = 0. \quad (21)$$

Из содержательного смысла модели следует, что $\forall i \quad \pi_i - p_i(t) a_i > 0$. Решение уравнений (21) представляется в виде

$$\begin{aligned} \psi_i^0(t) &= \frac{\pi_i - p_i(t) a_i}{k_i} (1 - e^{k_i(t-T)}), \quad i \in I(t), \\ \psi_i^0(t) &= \frac{\pi_i}{k_i} (1 - e^{k_i(t-T)}), \quad i \notin I(t). \end{aligned} \quad (22)$$

Нетрудно заметить, что все $\psi_i^0(t) > 0$ для $t < T$.

Так как функция Гамильтона является линейной функцией переменной u , а множество U является выпуклым многогранником, то оптимальное управление определяется из условия

$$\begin{aligned} u_i^0(t) &> 0, \quad i \in \tilde{I}(t), \quad \sum_{i \in \tilde{I}(t)} u_i^0(t) = C, \quad \tilde{I}(t) = \text{Arg max}_{1 \leq i \leq n} \psi_i^0(t), \\ u_i^0(t) &= 0, \quad i \notin \tilde{I}(t). \end{aligned}$$

Таким образом, весь объем имеющихся средств C в любой фиксированный момент времени распределяется между теми подсистемами (предприятиями, проектами), для которых величина $\psi_i^0(t)$, определяемая из (22), максимальна.

Оптимальная траектория согласно (19) находится из решения уравнений

$$\dot{x}_i^0(t) + k_i x_i^0(t) = u_i^0(t), \quad u_i^0(t) > 0, \quad i \in \tilde{I}(t), \quad \sum_{i \in \tilde{I}(t)} u_i^0(t) = C,$$

$$\dot{x}_i^0(t) + k_i x_i^0(t) = 0, \quad i \notin \tilde{I}(t).$$

Или более подробно

$$x_i^0(t) = (x_{0i} - \frac{u_i^0(t)}{k_i})e^{-k_i t} + \frac{u_i^0(t)}{k_i}, \quad u_i^0(t) > 0, \quad i \in \tilde{I}(t), \quad \sum_{i \in \tilde{I}(t)} u_i^0(t) = C, \quad (23)$$

$$x_i^0(t) = x_{0i} e^{-k_i t}, \quad i \notin \tilde{I}(t).$$

При этом для нахождения скалярных функций $p_i(t)$ нужно решить систему уравнений

$$a_i x_i^0(t) = a_j x_j^0(t), \quad i, j \in I(t),$$

$$\sum_{i \in I(t)} p_i(t) = 1.$$

Реализация этой линейной модели была осуществлена для описанной ниже ситуации.

Юридическое лицо, владеющее несколькими кофе-автоматами в г. Комсомольске-на-Амуре, ежемесячно тратит на сырье (кофе, какао, сахар, сливки и др.) в среднем 3000 р. на каждый автомат. Рассмотрим задачу наилучшего распределения дополнительных средств в размере $C = 2000$ р. между двумя кофе-автоматами с целью развития бизнеса (например, расширения и/или улучшения ассортимента) так, чтобы по возможности максимизировать дополнительную прибыль и минимизировать риск потерь дополнительной прибыли. Модель, описывающая процесс вложения дополнительных средств в момент времени t_0 , относится к классу непрерывных моделей с кусочно-непрерывным управлением. Поэтому для решения поставленной задачи использовалась модель (19), (20).

На основе статистических данных за последние восемь месяцев (см. табл. 1) были определены для каждого кофе-автомата в расчете на один стакан в рублях: максимальная прибыль $\pi_1 = 20,06$ и $\pi_2 = 18,58$, средние потери прибыли $a_1 = 1,29$ и $a_2 = 0,45$. Известно также из табл. 1, что постоянные расходы (аренда, уборка, электроэнергия, коммунальные платежи) на каждый кофе-автомат в расчете на один стакан в среднем составляют $k_1 = 6,74$ и $k_2 = 6,61$ р. Состояние каждого кофе-автомата в любой момент времени t есть количество стаканов $x_1(t)$ и $x_2(t)$, а $u_1(t)$ и $u_2(t)$ – средства, вкладываемые в каждый автомат. При этом $u_1(t) + u_2(t) = 2000$. Управление $u(t) = (u_1(t), u_2(t))$ является в данном случае кусочно-непрерывной вектор-функцией, такой, что

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0; t_0), \\ (u_1(t_0), u_2(t_0)), & t = t_0, \\ 0, & t \in (t_0; T]. \end{cases}$$

Для планового периода $T = 4$ месяца и для $t_0 = 1$ месяц, а также при начальных условиях $x_1(0) = 840$ и $x_2(0) = 1065$ (число стаканов за последний восьмой месяц) найдем оптимальное управление и оптимальную траекторию.

Чистая прибыль и постоянные расходы с двух кофе-автоматов с февраля по сентябрь

	Кофе-автомат 1	Кофе-автомат 2
февраль	18,31491	17,56706
чистая прибыль	17564	10347
стаканов	959	589
март	18,14871	17,75655
чистая прибыль	16842	11524
стаканов	928	649
апрель	18,03879	17,69158
чистая прибыль	12555	13021
стаканов	696	736
май	18,38374	18,1082
чистая прибыль	11306	11046
стаканов	615	610
июнь	18,46711	18,57874
чистая прибыль	8421	9438
стаканов	456	508
июль	20,05769	18,47811
чистая прибыль	2086	10976
стаканов	104	594
август	19,85106	18,42162
чистая прибыль	933	6816
стаканов	47	370
сентябрь	18,90595	18,40282
чистая прибыль	15881	19599
стаканов	840	1065
Среднее число стаканов	580	640
Расход (в месяц)	3915	4234
Расход (на стакан)	6,74	6,61

Если $\text{Arg max}_{i=1,2} a_i x_i^0(1) = 1$, то $p_1(1) = 1$, $p_2(1) = 0$, а $\text{Arg max}_{i=1,2} \psi_i^0(1) = 2$. Следовательно, $u_1^0(1) = 0$, $u_2^0(1) = 2000$ р., $x_1^0(1) = 0$, $x_2^0(1) = 303$ стакана согласно (23), а значение критерия в оптимальной точке есть 5499. Значит, все дополнительные средства нужно вложить во второй кофе-автомат.

Если $\text{Arg max}_{i=1,2} a_i x_i^0(1) = 2$, то $p_1(1) = 0$, $p_2(1) = 1$, а $\text{Arg max}_{i=1,2} \psi_i^0(1) = 1$. Следовательно, $u_1^0(1) = 2000$ р., $u_2^0(1) = 0$, $x_1^0(1) = 297$ стаканов, $x_2^0(1) = 0$ согласно (23), а значение критерия в оптимальной точке есть 5579. Значит, все дополнительные средства нужно вложить в первый кофе-автомат.

Если $\text{Arg max}_{i=1,2} a_i x_i^0(1) = \{1,2\}$, то $p_1(1) + p_2(1) = 1$, $p_{1,2}(1) \geq 0$ и $1,28 x_1^0(1) = 0,45 x_2^0(1)$. Оптимальное управление в данном случае находим из системы

$$1,28 \cdot \left[\left(840 - \frac{u_1^0(1)}{6,74} \right) e^{-6,74} + \frac{u_1^0(1)}{6,74} \right] = 0,45 \cdot \left[\left(1065 - \frac{u_2^0(1)}{6,61} \right) e^{-6,61} + \frac{u_2^0(1)}{6,61} \right], \quad u_1(1) + u_2(1) = 2000.$$

Следовательно, имеем $u_1^0(1) = 525$ р., $u_2^0(1) = 1475$ р. Оптимальная траектория согласно (23) есть $x_1^0(1) = 78$ стаканов, $x_2^0(1) = 224$ стакана. Значит, все дополнительные средства

нужно вложить как в первый, так и во второй кофе-автомат. Значения вспомогательных функций находим из системы

$$\frac{20,06 - 1,28p_1(1)}{6,74}(1 - e^{6,74(1-4)}) = \frac{18,58 - 0,45p_2(1)}{6,61}(1 - e^{6,61(1-4)}), \quad p_1(1) + p_2(1) = 1,$$

в которой первое уравнение соответствует $\psi_1^0(1) = \psi_2^0(1)$ согласно (22) для $i \in I(1)$. Получили $p_1(1) = 0,905$, $p_2(1) = 0,095$ и $\psi_1^0(1) = \psi_2^0(1) = 2,804$. Значение критерия в оптимальной точке есть 5647.

Таким образом, максимальное значение критерия соответствует случаю, когда дополнительные средства в размере 2000 р. распределяются между первым и вторым кофе-автоматами в количествах 525 и 1475 р. соответственно.

Заключение

Минимаксные задачи управления возникают не только в случае независимых рисков подсистем, но и в проблемах принятия решений при наличии многих критериев, гарантированной оценке в условиях неопределенности в описании процессов или воздействии внешней среды и т.д. При этом в зависимости от типа неопределенных параметров и способа оценки гарантированного результата могут возникать минимаксные задачи различного типа, в том числе и с негладкими подынтегральными функциями. Исследование таких задач может быть проведено по единой схеме, которая излагается для задачи максимизации (2), (3), (5). Отметим также, что наряду с необходимыми условиями оптимальности в теореме сформулированы условия, при которых решение задачи максимизации (2), (3), (5) существует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков, В. Н. Как управлять проектами / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – М.: НПО «СИНТЕГ»: ИЧП «Гео», 1997. – 188 с.
2. Васильев, Ф. П. Методы оптимизации / Ф. П. Васильев. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 823 с.
3. Горелик, В. А. Оптимальное управление в сложных экономических системах с использованием функции риска / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. – М.: ВЦ РАН, 2008. – С. 83-98.
4. Золотова, Т. В. Минимизация риска как основа совершенствования управления в сложных производственных системах / Т. В. Золотова // Качество. Инновации. Образование. – 2009. – № 1. – С. 32-39.
5. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М.: Физматлит, 2007. – 583 с.

Шпилев М. А., Ткачук А. А.
M. A. Shpilev, A. A. Tkachuk

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

A MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTROTECHNICAL PUMPING DEVICE WITH PERMANENT MAGNETS



Шпилев Михаил Анатольевич – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); 681027, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Пионерская, 61-25; 89241168570. E-mail: mishka120988@mail.ru.

Mr. Michail A. Shpilev – PhD Candidate, St.Petersburg State Transport University, the Department of Electrotechnical Theory. 61Pioneerskaya St., apt. 25, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Region, Russia; 8924116-85-70. E-mail: mishka120988@mail.ru



Ткачук Антон Андреевич – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); 196620, г. Санкт-Петербург, ул. Железнодорожная, 50-60; (7812) 457-81-42.

Mr. Anton A. Tkachuk – PhD Candidate, St.Petersburg State Transport University, the Department of Electrotechnical Theory. 50 Zheleznodorozhnaya St., apt. 60, Pushkin, Saint-Petersburg, Russia; (7812) 457-81-42.

Аннотация. В статье рассмотрены общие подходы к построению математической модели электротехнического устройства на основе обобщенного электромеханического преобразователя энергии. Рассмотрены конструкция, принцип действия и получена математическая модель перекачивающего устройства с постоянными магнитами.

Summary. The paper considers common approaches to building a mathematical model of an electrotechnical device containing generalized electromechanical energy converters. The design and principle of operation is analyzed, and a mathematical model of an electrotechnical pumping device with permanent magnets is developed.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, постоянные магниты, математическая модель.

Key words: electromechanical converter, permanent magnet, mathematical model.

УДК 621.313

Постановка задачи исследования. Теоретические основы, позволяющие проектировать и создавать электротехнические перекачивающие устройства (ЭПУ) на основе асинхронизированных электрических машин с постоянными магнитами, базируются на анализе процессов, характерных классическим электромеханическим преобразователям. Возможность и особенности применения асинхронных преобразователей с короткозамкнутыми обмотками без постоянных магнитов в качестве ЭПУ подробно рассмотрены в [3]. Несмотря на то, что таким устройствам характерны высокие надежность показатели, обусловленные в основном относительно простой конструкцией, их очевидным недостатком является высокая потребляемая реактивная мощность и, как следствие, низкий коэффициент мощности. Именно

поэтому вызывает интерес использование в перекачивающем устройстве постоянных магнитов, позволяющих не только снизить реактивную составляющую первичной мощности, но и улучшить выходные характеристики в целом. При этом для проектирования, разработки и исследования таких устройств требуется математическая модель, адекватно описывающая электромагнитные, тепловые и механические процессы в ЭПУ с учетом его конструктивных особенностей.

Анализ современного состояния проблемы математического моделирования электромеханических устройств. Вопросы математического описания электромеханического преобразования энергии составляют одну из важнейших проблем, в значительной степени определяющих состояние и темпы развития электроэнергетики в целом [2]. Несмотря на то, что общие принципы работы электромеханических преобразователей энергии хорошо известны, их теория продолжает непрерывно совершенствоваться как в плане более детального описания соответствующих физических процессов, так и в направлении создания универсальных аналитических методов исследования характеристик, автоматизации проектирования, оптимизации и т.п. Существенное углубление представлений о работе электромеханического преобразователя энергии связано со стремлением унифицировать описание различных типов электромеханических преобразователей на базе единой обобщенной теории [2; 4].

Уравнения электрических машин выводятся на основе теории электрических цепей исходя из того, что преобразование энергии происходит в воздушном зазоре и распределение векторов, характеризующих магнитное поле, известно. Основу математической теории электрических машин составляют уравнения Максвелла, уравнения Кирхгофа и уравнения движения. Теория электромеханического преобразования энергии непосредственно рассматривалась в работах М.В. Ломоносова, А. Ампера, Г. Ома, Д. Джоуля, Э. Ленца, Гельмгольца и других выдающихся физиков начала XIX в. Особое место занимают работы Д. Максвелла, который обобщил известные достижения и вывел уравнения, которые составляют теоретическую основу электромеханики [2].

Математической моделью электромагнитного поля нелинейной системы является система уравнений [2], в которую входят уравнения Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{d\vec{B}}{dt}, \end{aligned}$$

уравнение непрерывности магнитного поля

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0,$$

уравнение связи векторов индукции и напряженности магнитного поля

$$\vec{B} = \mu \vec{H},$$

где $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля; $\vec{J}$ – плотность тока; $\vec{E}$ – напряженность электрического поля; $\vec{B}$ – магнитная индукция; μ – магнитная проницаемость среды.

Уравнения Максвелла описывают связь между электрическим током и создаваемым им магнитным полем и характеризуют зависимость между изменяющимся во времени магнитным полем и создаваемым им электрическим полем. Уравнение непрерывности магнитного поля характеризует структуру магнитного поля. Из него следует, что линии магнитной индукции не имеют начал и концов. Поэтому при создании магнитного поля в односвязной рабочей зоне часть каждой линии магнитной индукции будет располагаться в окружающем эту зону пространстве. В математической модели магнитной системы, описанной уравнениями Максвелла, воспроизводится только пространственное распределение магнитного поля магнитных характеристик сред (магнитной проницаемости). Механические свойства сред (упругость, плотность) и механические явления в средах (поля механических напряжений и давлений) не воспроизводятся.

Также фундаментальным соотношением для описания процессов преобразования энергии является закон Ома в виде, устанавливающем связь между электрическим и магнитным полями и электрическим током, показывающий, что плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля:

$$\vec{J} = \frac{\vec{E}}{\rho},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление.

При исследовании электромеханических преобразователей с дискретными элементами используется формула для определения намагничивающей силы (НС) контура, трактуемая как второй закон Кирхгофа для магнитной цепи: НС в контуре равна алгебраической сумме магнитных напряжений в том же контуре:

$$F = \sum_{k=1}^m \Phi_k R_{Mk},$$

$$\Phi_k = B_k S_k,$$

$$R_{Mk} = \frac{l_k}{\mu_k} S_k,$$

где Φ_k – магнитный поток k -го участка; R_{Mk} – магнитное сопротивление k -го участка; μ_k – магнитная проницаемость k -го участка; l_k – длина k -го участка; S_k – площадь поперечного сечения k -го участка.

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме показывает, что количество тепла, выделяемого током в единице объема, определяется плотностью электрического тока:

$$P = \frac{E^2}{\rho} = \rho J^2.$$

Электромеханическое преобразование энергии базируется на многих физических законах, основными из которых являются законы электромагнетизма и механики. Однако проектирование современных электротехнических перекачивающих устройств дополнительно требует проведения тепловых, гидравлических и аэродинамических расчетов, базирующихся на законах тепло-, аэро- и гидродинамики и не учитываемых в явном виде в приведенных выше выражениях. Это приводит к необходимости учета физических процессов и конструктивных особенностей ЭПУ при разработке его математической модели.

Конструкция и принцип действия электротехнического перекачивающего устройства с постоянными магнитами. Несмотря на достаточно большое количество возможных конструктивных исполнений ЭПУ, практически все они имеют элементы, показанные на рис. 1.

Устройство состоит из магнитопровода с размещенной на нём двух- или трехфазной сетевой обмоткой и неподвижным элементом и вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки, выполненной в виде полого цилиндра, на внутренней поверхности которого сформированы и жестко связаны с ним « m » ($m = 2, 3 \dots$ – целое положительное число) напорных лопастей. На наружной поверхности полого цилиндра равномерно размещены « $2n$ » ($n = 1, 2 \dots$ – целое положительное число) постоянных магнитов чередующейся полярности. Вращающаяся вторичная обмотка и магнитопровод разделены зазором и дополнительным теплоизолирующим элементом, выполняющим функцию радиального и/или упорного подшипника скольжения и составляющим единое целое с магнитопроводом и первичной обмоткой. При подаче на сетевую обмотку напряжение от сети переменного тока проходящий по обмотке ток создает намагничивающую силу и переменное вращающееся магнитное поле, которое на основании закона электромагнитной индукции наводит электродвижущую силу и соответствующий ток, протекающий по цилиндру, что приводит к возникновению вращающего момента. При этом в первый момент времени вследствие инерционности неподвижного цилиндра

дра постоянные магниты не создают пускового вращающегося момента. Так как расположенный между внутренней поверхностью магнитопровода и внешней поверхностью полого цилиндра дополнительный теплоизолирующий элемент выполнен из антифрикционного материала, цилиндр приходит во вращение со скоростью, определяемой параметрами устройства и источника питания.

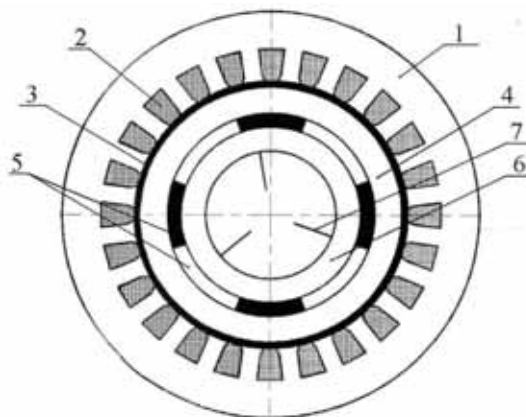


Рис. 1. Электротехническое перекачивающее устройство с постоянными магнитами:
1 – магнитопровод; 2 – сетевая обмотка; 3 – неподвижный элемент; 4 – воздушный зазор;
5 – постоянные магниты; 6 – вращающаяся обмотка; 7 – напорные лопасти

При этом частота вращения цилиндра ограничивается величиной скольжения, представляющей собой относительную разность скоростей вращения магнитного поля, создаваемого первичной обмоткой, и цилиндра. В режимах, близких к синхронным, то есть при сближении скоростей вращения магнитного поля и вращающейся обмотки, величина наведенной в цилиндре электродвижущей силы стремится к нулю, но при этом начинает проявляться взаимодействие между полями постоянных магнитов и первичной обмотки. В результате этого скорость вращения увеличивается и достигает значения, соответствующего скорости вращения магнитного поля первичной обмотки. При вращении обмотки, образованной полым цилиндром, на внутренней поверхности которого расположены напорные лопасти, жидкая среда перекачивается с производительностью, пропорциональной скорости вращения. Величина производительности, т.е. количество перекачиваемой жидкости в единицу времени зависит от скорости вращения, количества и формы напорных лопастей и площади поперечного сечения, определяющего гидравлическое сопротивление устройства. Использование постоянных магнитов для создания магнитного поля позволяет увеличить скорость углового перемещения вращающейся обмотки, что приводит к повышению производительности и улучшению эксплуатационных характеристик ЭПУ.

Анализ конструкции показывает, что математическое описание устройства может быть выполнено по аналогии с электромеханическим синхронным преобразователем переменного тока с демпферной обмоткой, функцию которой выполняет подвижный полый цилиндр.

Математическая модель электротехнического перекачивающего устройства с постоянными магнитами. Хотя первые работы Р. Парка, А.А. Горева, Г. Крона, Г.Н. Петрова и других ученых по математической теории электромеханических преобразователей появились уже в середине прошлого века и привели к модели и уравнениям обобщенной электрической машины, остается еще много вопросов при их практической реализации. С точки зрения математической теории электрических машин, развитие электромеханических преобразователей может идти по пути усложнения, видоизменения и увеличения числа уравнений напряжений, а также наращивания числа уравнений движения и их усложнения.

Обобщенная электрическая машина характеризуется заменой реальной многофазной и многополюсной машины двухфазной двухполюсной машиной с взаимно ортогональными обмотками на статоре и на роторе. Соответственно применительно к рассматриваемому устройству модель электротехнического перекачивающего устройства с постоянными магнитами в виде обобщенного электромеханического преобразователя энергии может быть представлена в виде, приведенном на рис. 2. Для принятой системы координат « d - q », неподвижной относительно вращающейся обмотки, введены следующие обозначения: U_{1q} , U_{1d} – напряжения сетевой обмотки соответственно по осям q и d ; U_{2q} , U_{2d} – напряжения обмотки неподвижного элемента по осям q и d ; U_{3q} , U_{3d} – напряжения демпферной обмотки по осям q и d ; U_{4q} , U_{4d} – напряжения фиктивной обмотки возбуждения по осям q и d .

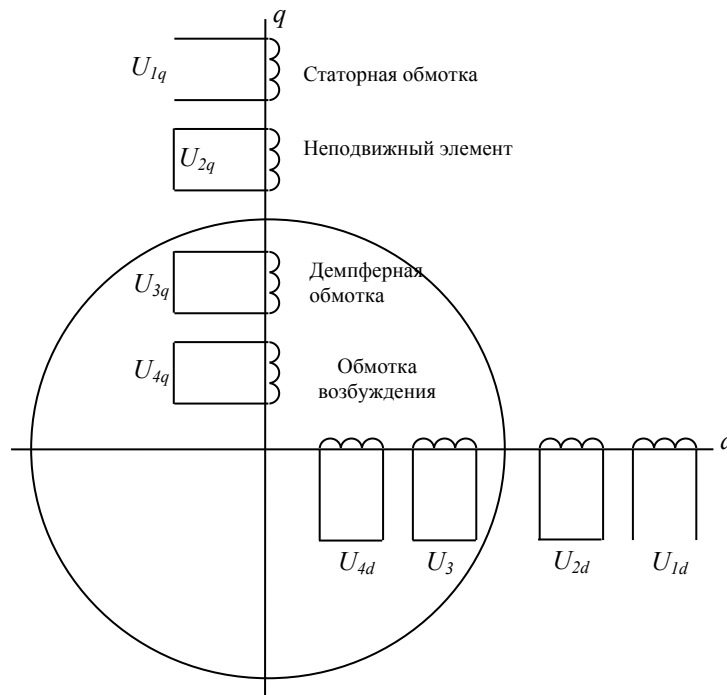


Рис. 2. Модель электротехнического перекачивающего устройства с постоянными магнитами

Хотя обмотка возбуждения на практике реализована с использованием постоянных магнитов (например, неодим-железо-бор, алюминий-никель-кобальт и т.п.), для унификации процесса моделирования может быть произведена их замена на источник фиктивной намагничивающей силы $(I\omega)_\Phi$ и внутренним сопротивлением $R_{м.вн}$ на основе кривой размагничивания постоянного магнита, как показано на рис. 3 [5]. При этом величина внутреннего сопротивления определяется как

$$R_{м.вн} = l_\Pi / (\rho \times S_\Pi),$$

где l_Π – длина постоянного магнита; S_Π – площадь сечения постоянного магнита; ρ – коэффициент возврата, определяемый по кривой размагничивания;

$$(I\omega)_\Pi = H_{сф} l_\Pi = (B_0 / \rho + H_0) l_\Pi,$$

где $H_{сф}$ – фиктивная коэрцитивная сила постоянного магнита; B_0 , H_0 – координаты точки максимальной энергии; B_0 – индукция, соответствующая линии возврата.

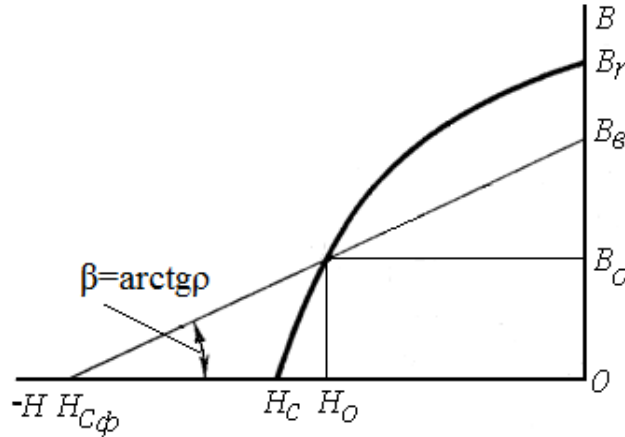


Рис. 3. Кривая размагничивания постоянного магнита

Система уравнений для напряжений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1d} = r_1 \cdot i_{1d} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} - \omega_{0эл} \cdot \psi_{1q}; \\ U_{2d} = r_2 \cdot i_{2d} + \frac{d\psi_{2d}}{dt} - \omega_{0эл} \cdot \psi_{2q}; \\ U_{3d} = r_3 \cdot i_{3d} + \frac{d\psi_{3d}}{dt}; \\ U_{4d} = R_{м.вн}(I\omega)_\phi + \frac{d\psi_{4d}}{dt}; \\ U_{1q} = r_1 \cdot i_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + \omega_{0эл} \cdot \psi_{1d}; \\ U_{2q} = r_2 \cdot i_{2q} + \frac{d\psi_{2q}}{dt} + \omega_{0эл} \cdot \psi_{1d}; \\ U_{3q} = r_3 \cdot i_{3q} + \frac{d\psi_{3q}}{dt}; \\ U_{4q} = 0, \end{array} \right.$$

где r_i – соответствующие обмоткам активные сопротивления; i_{jk} – составляющие токов в элементах устройства по осям q и d ; ψ_{lm} – составляющие потокосцепления по осям q и d ; $\omega_{0эл}$ – угловая частота питающего напряжения.

В этой системе полные потокосцепления обмоток определяются соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{1d} = L_{1d} \cdot i_{1d} + M_{12d} \cdot i_{2d} + M_{13d} \cdot i_{3d} + \psi_{14d}; \\ \psi_{2d} = L_{2d} \cdot i_{2d} + M_{12d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{3d} + \psi_{24d}; \\ \psi_{3d} = L_{3d} \cdot i_{3d} + M_{13d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{2d} + \psi_{34d}; \\ 0 = R_{м.вн}(I\omega)_\phi + M_{14d} \cdot i_{1d} + M_{24d} \cdot i_{2d} + M_{34d} \cdot i_{3d}; \\ \psi_{1q} = L_{1q} \cdot i_{1q} + M_{12q} \cdot i_{2q} + M_{13q} \cdot i_{3q}; \\ \psi_{2q} = L_{2q} \cdot i_{2q} + M_{12q} \cdot i_{1q} + M_{23q} \cdot i_{3q}; \\ \psi_{3q} = L_{3q} \cdot i_{3q} + M_{13q} \cdot i_{1q} + M_{23q} \cdot i_{2q}; \\ \psi_{4q} = 0, \end{array} \right.$$

где L_{vz} – полная собственная индуктивность, определяемая как $L_{vz} = M + l_{vz}$, где M – взаимная индуктивность; l_{vz} – индуктивности рассеяния обмоток. Индуктивность как количественная характеристика явления самоиндукции зависит от геометрии контура и магнитной проницаемости среды и ферромагнитных участков μ и в общем случае является функцией напряженности магнитного поля, создаваемого переменным током. Если принять, что все обмотки в расчетной модели имеют одинаковое количество витков, то взаимные индуктивности между

любыми двумя обмотками будут одинаковы. Взаимную индуктивность и индуктивности рассеяния определяют расчетным или опытным путем. Расчет этих параметров является сложной самостоятельной задачей, решение которой связано с нахождением распределения магнитного поля в преобразователе.

Подставка выражений полных потокоцеплений в систему уравнений для напряжений и учет того, что демпферная обмотка и неподвижный элемент выполнены короткозамкнутыми, позволяет получить математическую модель электротехнического перекачивающего устройства с постоянными магнитами [1].

Полученная модель является универсальной, так как позволяет определить параметры ЭПУ во всех режимах работы, в том числе и переходных. Для ее практической реализации необходимо задаться первичным напряжением и параметрами устройства (геометрические размеры, обмоточные данные и т.п.) и учесть, что коэффициенты, связанные с определяемыми величинами (активные сопротивления, индуктивности, взаимные индуктивности), в рассматриваемой системе являются нелинейными функциями этих величин и зависят от выходных параметров устройства (производительности, давления, температуры):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1d} = r_1 \cdot i_{1d} + p(L_{2d} \cdot i_{2d} + M_{12d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{3d} + \psi_{24d}) - \\ \quad - \omega_{0эл} \cdot (L_{1q} \cdot i_{1q} + M_{12q} \cdot i_{2q} + M_{13q} \cdot i_{3q}), \\ 0 = r_2 \cdot i_{2d} + p(L_{2d} \cdot i_{2d} + M_{12d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{3d} + \psi_{24d}) - \\ \quad - \omega_{0эл} \cdot (L_{2q} \cdot i_{2q} + M_{12q} \cdot i_{1q} + M_{23q} \cdot i_{3q}), \\ 0 = r_3 \cdot i_{3d} + p(L_{3d} \cdot i_{3d} + M_{13d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{2d} + \psi_{34d}), \\ 0 = R_{м.вн}(Iw)_\phi + p(L_{м.вн}(Iw)_\phi + M_{14d} \cdot i_{1d} + M_{24d} \cdot i_{2d} + M_{34d} \cdot i_{3d}), \\ U_{1q} = r_1 \cdot i_{1q} + p(L_{1d} \cdot i_{1d} + M_{12d} \cdot i_{2d} + M_{13d} \cdot i_{3d} + \psi_{14d}) + \\ \quad + \omega_{0эл} \cdot (L_{1d} \cdot i_{1d} + M_{12d} \cdot i_{2d} + M_{13d} \cdot i_{3d} + \psi_{14d}), \\ 0 = r_2 \cdot i_{2q} + p(L_{2q} \cdot i_{2q} + M_{12q} \cdot i_{1q} + M_{23q} \cdot i_{3q}) + \\ \quad + \omega_{0эл} \cdot (L_{1d} \cdot i_{1d} + M_{12d} \cdot i_{2d} + M_{13d} \cdot i_{3d} + \psi_{14d}), \\ 0 = r_3 \cdot i_{3q} + p(L_{3d} \cdot i_{3d} + M_{13d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{2d} + \psi_{34d}), \\ U_{4q} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

Система (1) должна быть дополнена уравнением движения, которое в общем виде записывается как:

$$M_j = (1/p) J d\omega_p / dt \pm M_c,$$

где ω_p – частота вращения подвижного элемента; M_j – электромагнитный момент; M_c – момент сопротивления вращению и перемещению; J – момент инерции подвижных элементов; p – число пар полюсов.

Уравнение движения для обобщенного электромеханического преобразователя с « m » обмотками на статоре и « n » обмотками на роторе в осях « α , β » подробно рассмотрено в работах [2; 3; 4] и записанное относительно момента сопротивления имеет вид:

$$\begin{aligned} M_c = J d\omega_p / dt + M_{1\alpha}^{sr} i_{1\alpha}^s i_{1\beta}^r - M_{1\beta}^{sr} i_{1\beta}^s i_{1\alpha}^r + M_{12\alpha}^{sr} i_{1\alpha}^s i_{2\beta}^r - M_{12\beta}^{sr} i_{1\beta}^s i_{2\alpha}^r + \\ + \dots + M_{1n\alpha}^{sr} i_{1\alpha}^s i_{n\beta}^r - M_{1n\beta}^{sr} i_{1\beta}^s i_{n\alpha}^r + M_{21\alpha}^{sr} i_{2\alpha}^s i_{1\beta}^r - M_{21\beta}^{sr} i_{2\beta}^s i_{1\alpha}^r + M_{22\alpha}^{sr} i_{2\alpha}^s i_{2\beta}^r - \\ - M_{22\beta}^{sr} i_{2\beta}^s i_{2\alpha}^r + \dots + M_{2n\alpha}^{sr} i_{2\alpha}^s i_{n\beta}^r - M_{2n\beta}^{sr} i_{2\beta}^s i_{n\alpha}^r + \dots + M_{mn\alpha}^{sr} i_{m\alpha}^s i_{n\beta}^r - M_{mn\beta}^{sr} i_{m\beta}^s i_{n\alpha}^r, \end{aligned}$$

где $i_{\alpha}^s, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^s, i_{\beta}^r$ – матрицы-столбцы, составленные из токов по оси « α , β » на статоре и роторе, r указывает расположение на роторе, s – на статоре; $r_{\alpha}^s, r_{\alpha}^r, r_{\beta}^s, r_{\beta}^r$ – активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Аналогично можно получить выражение динамического момента применительно к ЭПУ, заменив индексы « α, β » на « q, d », например:

$$M_d = 3/2 p (\psi_{1d} i_{1q} - \psi_{1q} i_{1d}) .$$

В зависимости от вида уравнений коэффициенты при переменных могут изменяться, поэтому при практической реализации важно иметь четкое представление о параметрах, учитываемых в математическом описании процессов преобразования энергии. В общем случае параметры машины являются периодическими и нелинейными. Уравнения электромеханического преобразования не имеют аналитического решения, так как они содержат произведения переменных и уравнения, в которых коэффициенты являются функциями зависимых переменных рассматриваемой системы и обычно исследуются численными методами.

Выводы

1. Проведенный анализ современных методов моделирования и проектирования электромеханических преобразователей показывает возможность их использования при разработке алгоритмов, программ и методики расчета электротехнических перекачивающих устройств с постоянными магнитами, для которых в настоящее время отсутствуют математические модели.

2. Полученная математическая модель электротехнического перекачивающего устройства с постоянными магнитами позволяет после приведения к нормированному виду составить структурную схему системы управления ЭПУ.

3. Система уравнений (1) описывает установившиеся и переходные режимы ЭПУ. В установившемся режиме уравнения напряжений и уравнение движения можно рассматривать раздельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль, Г. В. Буткевич, А. Г. Годжелло [и др.]. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
2. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. Ким, К. К. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы / К. К. Ким, С. Н. Иванов, В. М. Кузьмин. – СПб.: ОМ-Пресс, 2009.-347 с.
4. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
5. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.

Мокрицкий Б. Я., Бурков А. А., Шпилев А. М.
B. Y. Mokritsky, A. A. Burkov, A. M. Shpilev

К ВОПРОСУ О ПУТЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ ЗУБОФРЕЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ON WAYS OF UPGRADING EQUIPMENT GEAR HOBGING



Мокрицкий Борис Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Y. Mokritsky – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher with the Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: boris@knastu.ru.



Бурков Александр Алексеевич – доктор технических наук, профессор, проректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sdsov@knastu.ru.

Mr. Alexander A. Burkov – Doctor of Engineering, Professor, Provost of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: sdsov@knastu.ru.



Шпилёв Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru

Mr. Anatoly M. Shpilev – Doctor of Engineering, Professor, Rector of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru

Аннотация. Работоспособность металлорежущего инструмента во многом определяется полнотой использования его режущих возможностей. Например, у червячных фрез редко удаётся добиться того, чтобы на максимально допустимую величину были изношены более половины штук зубьев фрезы. А при восстановлении режущих возможностей фрезы все зубья, в том числе и с минимальным износом, подвергаются переточке на одинаковую величину, определяемую по величине износа максимально изношенного зуба. Это нерационально. Повысить полноту использования режущих возможностей червячных фрез можно за счёт модернизации зубофрезерного станка, в частности за счёт обеспечения осевого смещения фрезы в процессе зубофрезерования, изменения кинематики и компоновки станка.

Summary. Operability and normal performance of cutting tools is largely dependent on whether their cutting capabilities are used to the full. For instance, worm-mills rarely have more than 50% of their teeth worn out to a maximum degree. During repair of such a mill, all of its teeth are cut anew, including those just slightly run-out, to the same length as determined by the maximum depreciation of teeth. This does not seem efficient or reasonable. We can improve the degree of use of a gear-mill's cutting capabilities by modernization of a gear-milling machine, in particular, by providing axial displacement of the cutter during gear-milling process, and by changing cinematic and layout of the machine.

Ключевые слова: зубофрезерование, кинематика станка, компоновка станка, работоспособность червячных фрез.

Key words: gear-milling, machine kinematics, machine layout, hob performance.

УДК 621.9

Введение

Металлорежущий станок является частью технологической системы резания. Управляя параметрами качества станка, можно влиять на процессы, происходящие в зоне резания, и тем самым влиять на выходные параметры технологической системы резания, например [1], на работоспособность инструмента.

Исходные положения

В практике используют три способа зубофрезерования:

1) диагональное зубофрезерование с максимальным углом γ наклона вектора подачи к оси колеса;

2) фрезерование с подачей вдоль зуба нарезаемого косозубого колеса (угол γ равен углу наклона зуба колеса);

3) обычное зубофрезерование, когда подача направлена вдоль оси колеса (угол $\gamma = 0$).

Каждый из указанных способов зубофрезерования при нарезании косозубого колеса может быть реализован при любой (см. рис. 1) из четырех схем резания (сочетаний направлений зубьев колеса, витков фрезы и подачи): схема РВ – разноименные фреза и колесо, встречная подача; РП – разноименные фреза и колесо, попутная подача; ОВ – одноименные фреза и колесо, встречная подача; ОП – одноименные фреза и колесо, попутная подача.

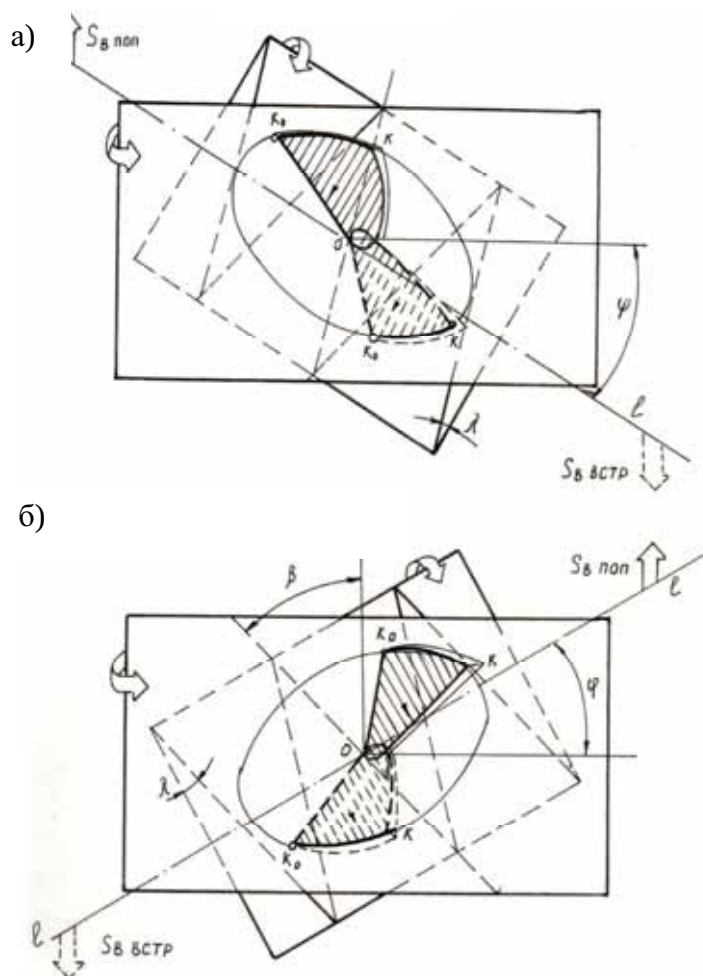


Рис. 1. Фигура зон резания для разных схем резания [2]:
а – колесо левое; б – колесо правое

Рассмотрим простейший пример поштучного и пакетированного нарезания колёс (модуль 3 мм, диаметр 132 мм, ширина 18 мм) на зубофрезерном станке. Нарежем некоторое количество (например 4 штуки) зубчатых колёс поштучно и измерим величину износа всех задействованных в резании зубьев фрезы, отметим величину износа наиболее изношенного зуба. Сложим такое же количество (4 штуки) заготовок колёс в пакет (без зазора между торцами заготовок) и нарежем на них зубья. Измерим износ. При равном объёме удалённого с заготовок металла (из впадин между зубьями при поштучном нарезании 4 колёс и при нарезании такого же количества колёс в пакете удаляется одинаковый объём материала колеса) величина износа в первом случае будет больше, причём, чем меньше угол наклона зубьев нарезаемого колеса, тем больше будет эта разница (см. рис. 2).

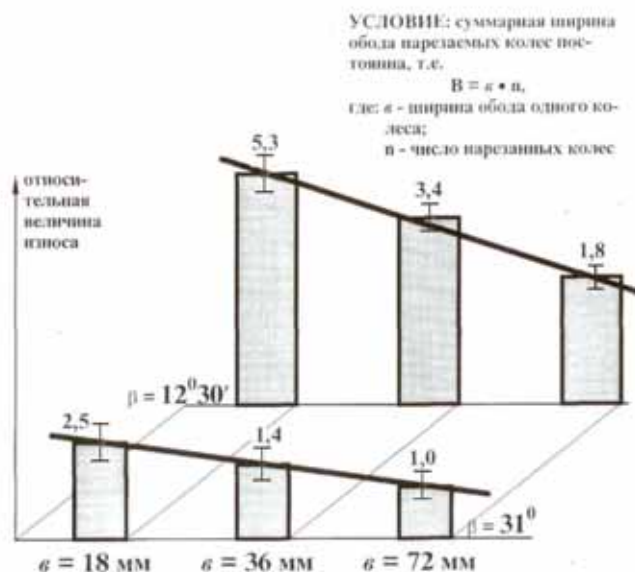


Рис. 2. Примеры влияния условий нагружения на работоспособность инструмента (в горизонтальной плоскости по осям обозначена ширина обода колеса, мм, и величина угла наклона зуба, градусы)

Это обусловлено различием в условиях нагружения зубьев фрезы. Чем уже колесо, тем более заметно влияние геометрии срезаемого слоя на интенсивность износа инструмента. Изменение геометрии срезаемых слоёв в процессе нарезания колеса иллюстрировано на рис. 3.

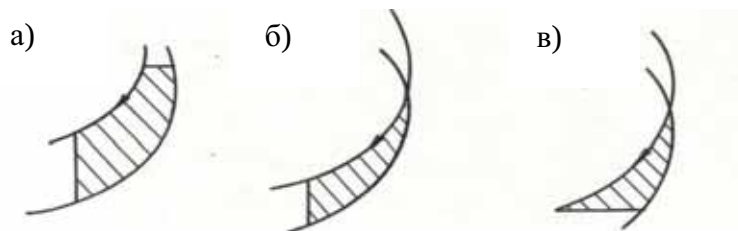


Рис. 3. Изменение формы срезаемого слоя: а – период врезания фрезы, б – период установившегося резания, в – период выхода фрезы

Процесс зубофрезерования колеса во времени можно разделить на три периода:

1) период врезания. Начинается с момента касания фрезы и колеса и заканчивается в момент полного "опускания" фигуры зоны резания (см. рис. 3) в тело заготовки;

2) период установившегося резания. Начинается с момента окончания периода врезания и продолжается все время, пока фигура зоны резания полностью находится в теле заготовки;

3) период выхода. Начинается с момента окончания установившегося периода и заканчивается в момент полного "выхода" фигуры зоны резания из тела заготовки.

Указанные периоды разделены из условия положения зоны резания в теле заготовки: в одном случае она полностью в теле, в других - лишь ее участки.

В табл. 1 приведены данные об относительной величине (в относительных единицах, т.е. один из случаев взят за единицу) износа наиболее изношенного зуба фрезы при нарезании колес с модулем 3 мм и наружным диаметром 132 мм при вертикальной подаче 2 мм/об. заг. при обычном способе зубофрезерования. Число нарезанных колес выбрано так, чтобы произведение ширины обода колеса на число нарезаемых колес во всех случаях оставалось постоянным. В скобках показана доля (в процентах от общего числа циклов нагружения зуба) числа циклов нагружения, приходящаяся на переходные периоды.

Таблица 1

Влияние геометрии срезаемых слоев на износ зубьев червячной фрезы

Угол наклона зубьев колеса	Ширина колеса, мм	Количество колес, шт.	Схема резания			
			Разноименная встречная	Разноименная попутная	Одноименная встречная	Одноименная попутная
12°30'	18	4	2,21(55,2)	2,16(90,0)	5,53(100,0)	3,6 (70,0)
	36	2	2,02(28,4)	1,96(48,3)	4,92 (74,3)	3,45(42,4)
	72	1	1,86(17,4)	1,66(34,1)	4,68 (48,0)	3,4 (24,6)
21°50'	18	4	1,91(36,0)	1,7(72,4)	3,7(86,7)	3,07(47,3)
	36	2	1,65(19,0)	1,47(43,7)	3,16(56,4)	2,95(25,7)
	72	1	1,7(10,9)	1,33(24,8)	3,56(29,2)	2,04(14,6)
31°	18	4	1,3(36,0)	1,23(53,0)	2,53(59,4)	2,55(47,2)
	36	2	1,27(20,2)	1,13(28,4)	2,08(35,4)	2,46(27,2)
	72	1	1,53(10,4)	1,00(16,6)	2,21(19,1)	2,15(14,3)

Из величины суммарного износа наиболее изношенного зуба выделим (в процентах) часть, приходящуюся на переходные периоды зубофрезерования (числитель в табл. 2), а из этой части выделим долю (в процентах от износа за время переходных периодов), приходящуюся на период врезания (знаменатель в табл. 2).

Таблица 2

Доля (%) переходных периодов в процессе зубофрезерования

Угол наклона зубьев колеса	Ширина обода, мм	Количество колес, шт.	Схема резания			
			Разноименная встречная	Разноименная попутная	Одноименная встречная	Одноименная попутная
12°30'	18	4	41/57	84/63	100/69	47/64
	36	2	20/54	30/57	42/64	31/59
	72	1	11/51	18/52	29/61	14/56
21°50'	18	4	28/56	49/63	62/67	39/60
	36	2	11/52	21/54	38/62	23/57
	72	1	7/50	14/50	14/59	11/53
31°	18	4	18/54	32/60	57/60	37/56
	36	2	11/50	18/52	32/59	21/55
	72	1	7/49	11/49	12/58	10/52

Так, например, для случая $\beta = 12^\circ 30'$, $B = 18$ мм при разноимённой встречной схеме резания число резов в переходные периоды составляет 55,2 % от всех резов за период нарезания колеса. За это число резов в переходные периоды зуб получает 41 % от всей величины износа, причем 57 % от этой доли износа приходится на период врезания.

Приведённые сведения показывают как значительно (до 5,3 раз по рис. 2) влияют условия нагружения на работоспособность инструмента, а сведения, приведённые в табл. 1 и 2, объясняют, с чем это связано. Если ещё учесть влияние изменений условий нагружения инструмента при изменении способа зубофрезерования (см. рис. 4 [3]), то становится очевидной необходимость модернизации зубофрезерного оборудования для обеспечения рациональных условий нагружения инструмента с целью минимизации износа инструмента и полноты использования его режущих возможностей. При этом могут быть целесообразны решения, способствующие повышению жёсткости станка, так как это также способствует повышению работоспособности инструмента.

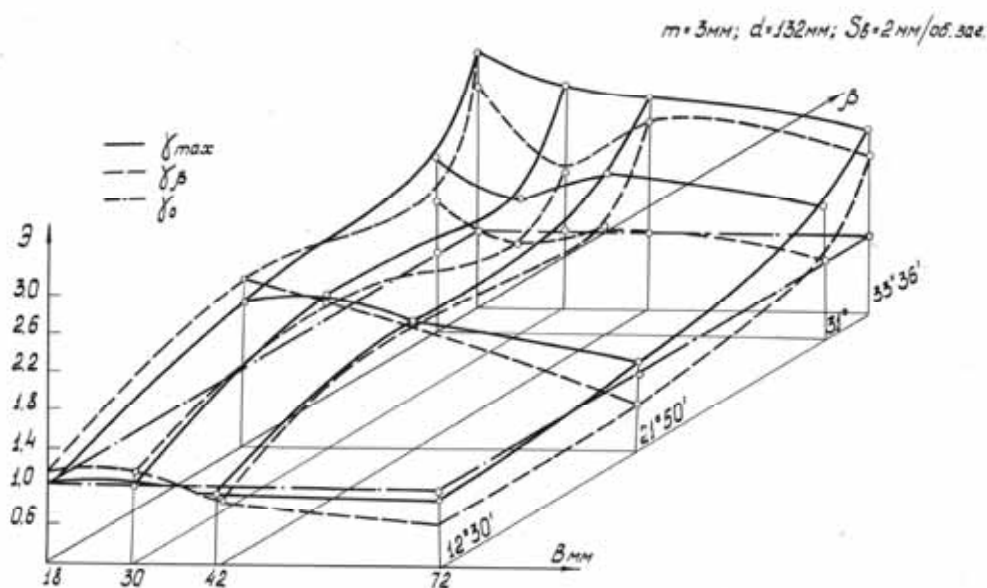


Рис. 4. Относительная эффективность использования режущих возможностей фрезы при разных технологических методах зубофрезерования:

- — при диагональном зубофрезеровании,
- — при зубофрезеровании вдоль оси нарезаемого косозубого колеса,
- · - · - · — при обычном зубофрезеровании

Анализ полученных данных позволяет сформулировать следующие выводы:

1. С уменьшением ширины обода, следовательно, с увеличением доли переходных периодов, величина износа фрезы возрастает. Некоторое нарушение этой закономерности для больших ($> 20^\circ$) углов наклона зубьев колеса при одноименном сочетании пары фреза - колесо объясняется резким влиянием на величину износа трапециевидальной формы срезаемых слоев.

2. С увеличением угла наклона зубьев колеса величина износа фрезы уменьшается. Это объясняется уменьшением числа циклов нагружения наиболее изношенного зуба и увеличением числа используемых зубьев фрезы.

3. Схемы резания существенно (до 2,9 раз) неравноценны по величине износа. С увеличением угла наклона зубьев колеса степень неравноценности схем резания меньше. Это объясняется уменьшением ширины зоны резания с увеличением угла наклона зубьев и меньшей разницей в числе циклов нагружения для различных схем резания. Минимальная

величина износа наблюдается при разноименной попутной схеме резания, что объясняется наиболее благоприятной формой и размерами слоев, срезаемых наиболее нагруженным зубом.

4. Доля переходных периодов для рассматриваемых параметров колес велика и иногда составляет 100 %, что говорит об отсутствии периода установившегося резания.

5. Чем меньше ширина обода колеса, тем большая доля износа приходится на переходные периоды и тем больше в ней доля износа, приходящаяся на период врезания. Это объясняется тем, что с уменьшением ширины обода (см. значения в скобках табл. 1) число циклов нагружения слоями переходных периодов возрастает.

6. Чем больше угол наклона зубьев колеса, тем меньше для той же ширины обода доля износа за время переходных периодов и меньше в ней доля износа, приходящаяся на период врезания. Это объясняется тем, что с увеличением угла наклона зубьев зона резания становится уже и число циклов нагружения в переходные периоды убывает.

7. Схемы резания существенно (до 2 раз) неравноценны по износу, приходящемуся на переходные периоды.

8. Условия нагружения вершинных кромок и использования длины режущей части фрезы за период нарезания колеса по различным схемам резания и способам фрезерования существенно неравноценны.

Кинематические особенности процесса зубофрезерования и зубофрезерных станков. Варианты модернизации станков.

Нарезание зубчатого колеса на зубофрезерном станке типовой компоновки и конструкции осуществляется с использованием четырёх формообразующих движений:

- 1) вращения червячной фрезы вокруг своей оси,
- 2) соответствующего вращения нарезаемого колеса,
- 3) перемещения червячной фрезы вдоль оси нарезаемого косозубого колеса,
- 4) доворота нарезаемого колеса, соответствующего углу наклона зуба.

При стремлении правильно использовать режущие возможности червячной фрезы (метод диагонального зубофрезерования) к этим четырём движениям добавляется ещё два формообразующих движения, а именно: смещение червячной фрезы вдоль своей оси и соответствующий этому смещению доворот нарезаемого колеса. Каждое движение реализуется соответствующей кинематической цепью. Количество этих цепей и количество элементов в каждой цепи влияют на кинематическую точность станка. Необходимость поступательного перемещения фрезы вдоль оси колеса вынуждает создавать консольную конструкцию фрезерного суппорта, что негативно отражается на жесткости станка. Необходимость обеспечения вращения фрезы и её перемещения вдоль оси шпинделя, вращающегося в таком консольном фрезерном суппорте, снижает жёсткость самого фрезерного суппорта. Такие конструктивные особенности компоновки типового зубофрезерного станка ограничивают точность и жёсткость станка, а также лимитируют работоспособность инструмента за счёт непостоянства условий его нагружения.

Из вышесказанного следует, что снижение количества формообразующих движений и уменьшение количества движений элементов станка во фрезерном суппорте может положительно повлиять на кинематическую точность станка, на его жёсткость и работоспособность инструмента. Для этого необходима целенаправленная модернизация станка. Рассмотрим проблему путём описания явлений без привлечения в рамках данной статьи расчётов точности и жёсткости станка.

Пример повышения точности и жёсткости станка показан на рис. 5, где модернизация станка реализована применением поворотных направляющих, т.е. направляющие для перемещения фрезерного суппорта поворачиваются на угол, равный углу наклона зуба нарезаемого косозубого колеса. При такой компоновке станка отпала необходимость в ряде формообразующих движений. Вместо шести формообразующих движений нарезание зубчатого ко-

леса осуществляется при трёх движениях: 1) вращении фрезы вокруг своей оси (главное движение резания), 2) вращении колеса (движение обката), 3) поступательном перемещении фрезы вдоль линии зуба нарезаемого колеса (движение подачи). Кинематические цепи этих движений короткие, число элементов в них мало. Это послужило основой повышения точности и жёсткости. Однако и в этом случае фрезерный суппорт исполнен консольно и подвижным по направляющим, т.е. привносит те же недостатки, что и в станке типовой компоновки.

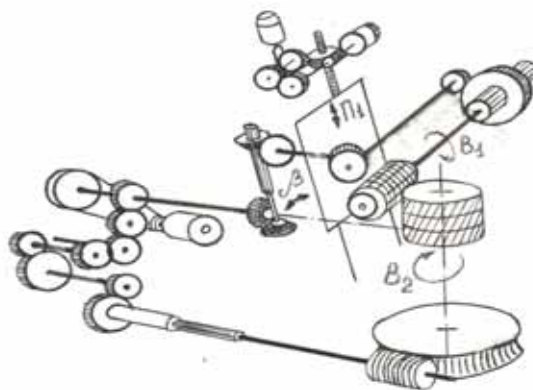


Рис. 5. Принципиальная кинематическая схема зубофрезерного станка с наклонными (поворотными) направляющими (рисунок заимствован из буклетов фирм «Pressimo» и «Pfauter»)

Другой пример направления модернизации станка показан на рис. 6, где осуществлена замена поступательного перемещения суппорта на поступательное перемещение шпинделя стола с нарезаемым колесом.

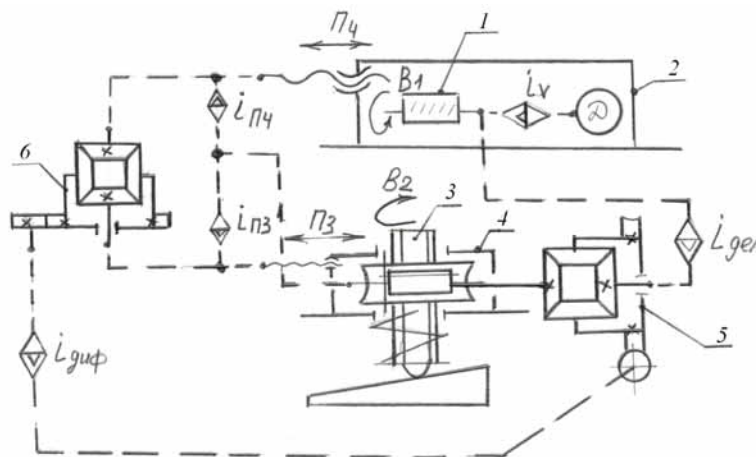


Рис. 6. Структурная схема зубофрезерного станка с модернизацией движения подачи

Кинематика такого станка предусматривает вращательное движение B_1 фрезы 1. От шпинделя фрезы движение заимствуется в кинематическую цепь деления, величина движения настраивается гитарой деления $i_{дел}$, передаётся через основной дифференциал 5 и реализуется вращением B_2 шпинделя 3 изделия. Вращение с основного дифференциала 5 также передаётся в кинематическую цепь подачи. Она позволяет иметь поочерёдно либо движение подачи Π_3 стола 4 изделия, либо движение подачи Π_4 фрезерного суппорта 2. Величины этих подач настраиваются соответствующими гитарами $i_{ПЗ}$ и $i_{П4}$. Возможно одновременное применение этих подач в одном или разных направлениях. Доворот нарезаемого колеса в связи с

углом наклона зуба колеса и наличием движения подач настраивается гитарой дифференциала i_{dif} и с дополнительного дифференциала 6 подаётся на основной дифференциал 5.

Сравнение эквивалентных схем зубофрезерного станка традиционной компоновки (рис. 7, а) и станка предложенной компоновки (см. рис. 7, б) показывает, что предложенный вариант обладает значительно большими возможностями для повышения динамической жёсткости и, соответственно, точности станка.

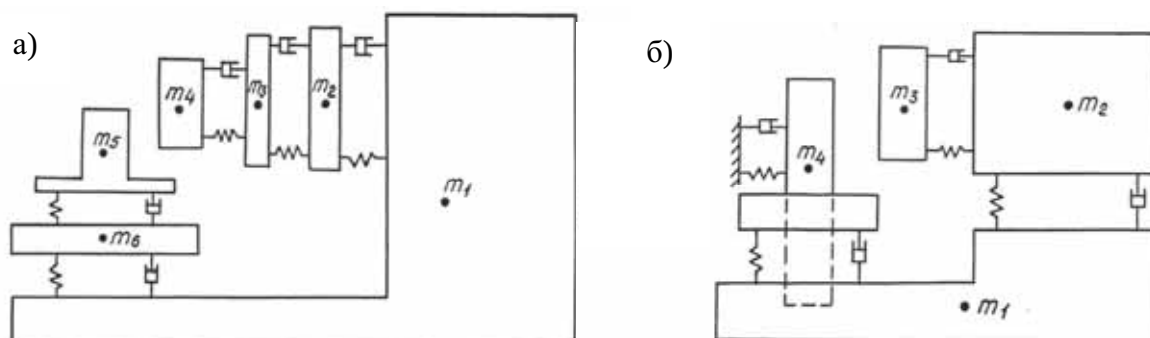


Рис. 7. Эквивалентные схемы зубофрезерных станков:

- а – традиционной компоновки (m_1 – масса стойки станка, m_2, m_3, m_4 – масса элементов фрезерного суппорта, m_5 – масса оправки станка с нарезаемым колесом, m_6 – масса стола);
 б – предложенной компоновки (m_1 – масса станины, m_2 – масса фрезерной бабки, m_3 – масса фрезерного суппорта, m_4 – масса оправки стола с нарезаемым колесом)

Пример модернизации станка с традиционной компоновкой путём обеспечения поступательного перемещения нарезаемого колеса вместо перемещения фрезерного суппорта показан на рис. 8. Для этого либо стол должен быть выполнен подвижным на своих направляющих, либо оправка стола должна быть заменена на подвижный шпиндель изделия.

Краткое описание принципа работы таких столов состоит в следующем. Подвижный стол 6 (см. рис. 8, а) на направляющих 1 содержит вращающийся шпиндель 5 изделия с червячным колесом 3 и червяком 4 кинематической цепи (вал 2) деления.

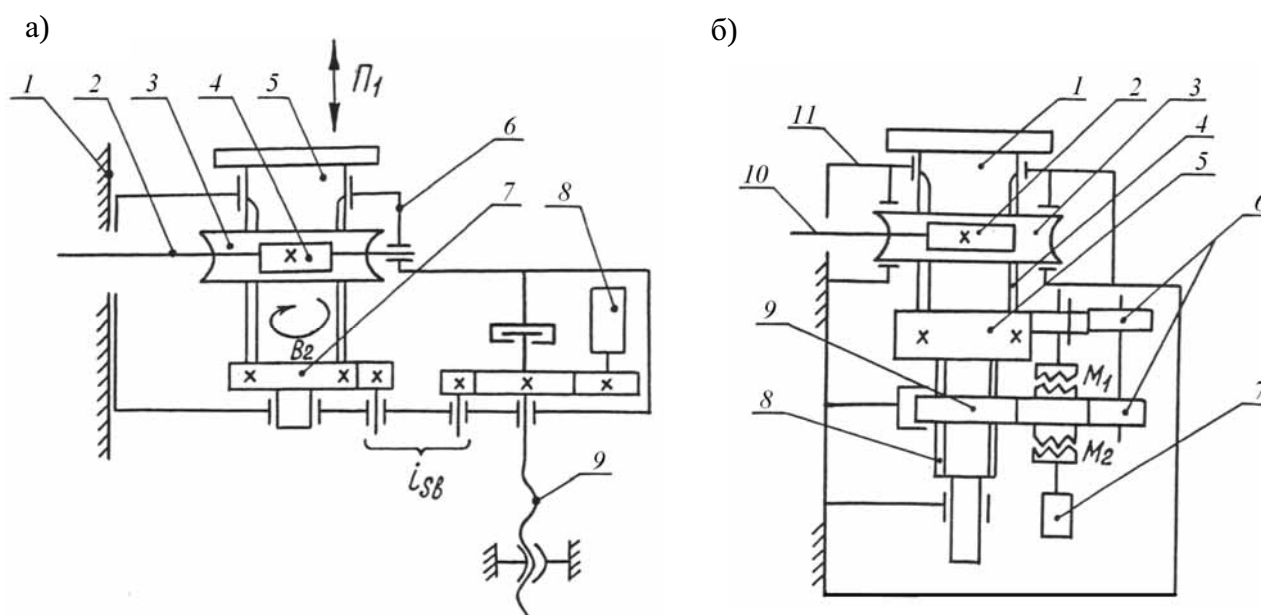


Рис. 8. Кинематические схемы подвижного и неподвижного столов с встроенной кинематической цепью подач



Шпиндель снабжён зубчатым колесом 7, взаимодействующим с цепью подач (переключение P_1), содержащей ходовой винт 9 и привод 8.

Неподвижный стол 11 (см. рис. 8, б) содержит вращающийся (цепь деления содержит аналогичные позиции 3, 2 и 10) шпиндель 1 со шлицами 4 и ходовым винтом 8. На шпинделе установлено колесо 5 для заимствования вращения в цепь подач и колесо 9 (отверстие колеса исполнено в виде гайки, сопрягающейся с ходовым винтом 8 шпинделя) для обеспечения поступательного движения шпинделя вдоль своей оси. Управление величиной и направлением подачи осуществляется через муфты M_1 и M_2 , колеса 6 и привод (ручной) 7. Такая модернизация станка тоже позволяет повысить точность обработки за счёт того, что большее число движений сосредоточено в том узле станка (в столе), который более жёсткий и массивный.

Резюме

Показаны примеры модернизации зубофрезерных станков с традиционной компоновкой с целью повышения эксплуатационных характеристик. Модернизация позволила не только упростить кинематическую схему станка, но и более полно использовать режущие возможности червячной фрезы, повысить кинематическую точность и динамическую жёсткость станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокрицкий, Б. Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путём управления свойствами инструментального материала: моногр. / Б. Я. Мокрицкий. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 232 с.
2. Шунаев, Б. К. Износостойкость червячных фрез и технологические методы нарезания косозубых колес / Б. К. Шунаев, Б. Я. Мокрицкий, Е. В. Кусова // Станки и инструмент – 1977. – № 4. С. 25-26.
3. Шунаев, Б. К. Использование червячных фрез при нарезании зубчатых колёс / Б. К. Шунаев, Б. Я. Мокрицкий // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1978. – № 8. – С. 172-176.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY

Верхотуров А. Д., Шпилёв А. М., Евстигнеев А. И., Макиенко В. М., Коневцов Л. А.
A. D. Verkhoturov, A. M. Shpilyov, A. I. Yevstigneyev, V. M. Makienko, L. A. Konevtsov

О НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ

MATERIALS SCIENCE: NEW TRENDS AND TENDENCIES



Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

Mr. Anatoly D. Verkhoturov – Doctor of Engineering, Professor, senior researcher at the Institute of Water and Environmental Problems, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.



Шпилёв Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilyov – Doctor of Engineering, Professor, Rector of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rector@knastu.ru.



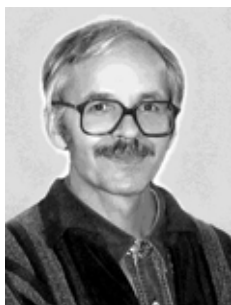
Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: prorector-nr@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Yevstigneyev – Doctor of Engineering, Professor, Provost for Research of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: prorector-nr@knastu.ru.



Макиенко Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения (Россия, Хабаровск). E-mail: main_tm@festu.khv.ru.

Mr. Victor M. Makienko – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology (Russia, Khabarovsk). E-mail: main_tm@festu.khv.ru.



Коневцов Леонид Алексеевич – научный сотрудник УРАН Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: konevts@narod.ru.

Mr. Leonid A. Konevtsov – Researcher, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Research Centre the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: konevts@narod.ru.

Аннотация. Последнее десятилетие показало, что в научно развитых странах всё чаще материаловеды обращают внимание на новый характер науки о материалах, связанный с циклическим круговоротом вещества и материалов в природе и глобальными проблемами человечества. В связи с этим в работе показаны основные направления развития науки о материалах, зарождение в настоящее время нового её направления – энтропийно-экологического. Рассмотрены цели, задачи, методологические основы, критерии энтропийной и экологической безопасности нового направления, основой которого является циклический круговорот вещества и материалов во «второй природе».

Summary. It has been demonstrated in the last decade that, in scientifically advanced countries, materials engineers are increasingly interested in a new aspect of the science linked to the cycle of matter and materials in the environment and global problems of humankind. In the paper we try to show the main routs of the materials science development and the birth of its new branch called "environmental/entropic". The goals, problems and methodology of it have been considered, along with criteria for environmental and entropic safety proceeding from the concept of the cycle of elements and materials in the "second nature".

Ключевые слова: наука о материалах, энтропия, экология, материаловедение, методология, устойчивое развитие человечества.

Key words: materials science, entropy, environment, materialogy, methodology, sustainable development of humankind.

УДК 669

Введение

Известно значительное влияние материалов на развитие человеческой цивилизации, начиная с древнейших времён (X-XIII вв. до н.э.) и до наших дней, при этом их влияние на общий прогресс человеческого общества непрерывно повышается [6; 7; 10; 11; 19]. Тем не менее наука о материалах возникла сравнительно недавно (XVII-XIX вв.), однако в своём развитии прошла ряд последовательных этапов (см. рис. 1), начиная с «инкубационного» периода и кончая материаловедением, которое в англоязычных странах называют «наукой о материалах» [20].



Рис. 1. Схема развития науки о материалах: 1 – открытие Периодического закона (Менделеев); 2 – начало металлографии; 3 – начало металловедения; 4 – начало материаловедения; 5 – начало структурно-аналитического материаловедения; 6 – начало энтропийно-экологического материаловедения; 5', 6', 6'' – текущее состояние развития науки о материалах; 7 – материаловедение

Следует отметить, что термин «наука о материалах» – обобщённое понятие и может использоваться для характеристики любого этапа, а не только материаловедения. Первый научный подход по изучению, поиску новых материалов (элементов) предложил Д.И. Менделеев на основе разработанной им эмпирическим путём таблицы элементов [6; 7; 19]. Далее наука о материалах развивалась на основе полученных экспериментальных данных с использованием создаваемых оптических, спектральных, рентгеновских установок и других устройств и приборов. При этом основной парадигмой металлографического,

металловедческого и материаловедческого этапов было изучение взаимосвязи «состав-структура-свойства» [6; 7]. Однако потребности практики настоятельно ставили задачу не только изучение указанной взаимосвязи, но и разработки теории и технологии создания перспективных материалов. В связи с этим выдающийся материаловед Г.В. Самсонов предложил новую парадигму [15], устраняющую недостаток первой – «состав-технология-структура-свойства» и поднимающую материаловедение на новую ступень развития. При этом Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко [15] отмечали, что центральной категорией в материаловедении постепенно становится категория «структуры». Более того, академик И.В. Тананаев [16] предлагал четырёхзвенную структуру парадигмы материаловедения: «состав-структура-дисперсность-свойства». Под дисперсностью он имел в виду «размеры частиц, наименьшие из которых граничат с молекулярным уровнем». Таким образом, И.В. Тананаев стоял у истоков наноматериаловедения. Однако это направление (в начале 70-х гг. XX в.) не получило поддержку у научной и политической общественности СССР, а затем РФ.

До середины XX в. преобладал эмпирический подход к проблеме создания перспективных материалов, основанный на парадигме Г.В. Самсонова, возможности которого не позволяли в полной мере осуществить разработку теории создания материалов с заданными свойствами. В связи с этим в недрах эмпирического подхода стал развиваться структурно-аналитический подход («электронное материаловедение») [15], основанный на изучении влияния электронной структуры материала на его свойства. То есть расчёт свойств на электронном уровне, так как электронная структура является «той общей основой, через которую могут быть выражены все другие типы структур». Возможности данного подхода постоянно растут с появлением новой компьютерной техники. Вслед за структурно-аналитическим подходом возникло компьютерное моделирование материалов, имеющее значительные перспективы в решении проблемы создания материалов с заданными свойствами [11; 12].

С использованием этих подходов в XX в. были достигнуты значительные успехи в создании материалов с заданными свойствами. Были созданы сверхпроводники, полупроводники, композиты, новая керамика, сплавы с памятью формы, тугоплавкие соединения и т.д. Кроме того, свойства ранее разработанных эмпирическим путём материалов были значительно улучшены. В связи с этим можно утверждать, что в конце XX в. наступил новый этап в развитии науки о материалах, основанный на структурно-аналитическом подходе для решения проблемы материалов с заданными свойствами (см. рис. 1). Следовательно, в настоящее время наука о материалах имеет два основных подхода к проблеме создания и получения перспективных материалов: экспериментальный и структурно-аналитический, который имеет большое будущее для дальнейшего развития науки о материалах. Следует отметить, что сочетание названных двух подходов имеет также большое значение в развитии науки о материалах, если не сказать, основное направление.

Развитие структурно-аналитического подхода явилось следствием разработки теории и практики наноматериаловедения. Для структурно-аналитического подхода имеется много «места» не только «внизу» [13], но и «вверху» и «влево-право» (см. рис. 2). Как видно из рис. 2, «поле» поисков в создании перспективных материалов необычайно широко, и наступает новый этап в науке о материалах, заключающийся в возможности «сборки» материалов с использованием отдельных атомов.

Однако триумф структурно-аналитического и экспериментального материаловедения в конце XX и начале XXI вв. сопровождался возникновением глобальных проблем, возникших перед наукой о материалах. На дальнейшее развитие науки о материалах оказывают всё возрастающее влияние глобальные проблемы человечества и в большей мере катастрофическое истощение не возобновляемых минеральных ресурсов и связанных с их добычей, переработкой и получением материалов экологических проблем, грозящих гибелью человечества.



Рис. 2. Условное поле поиска с предлагаемыми ограничениями создания материалов

В конце XX – начале XXI вв. произошли масштабные изменения вектора развития человеческой цивилизации, которые повлияли как на развитие науки [4], так и материаловедения. Это было связано с появлением глобальных проблем человечества, в том числе катастрофическим уменьшением запасов не возобновляемых ресурсов и экологических проблем. Перед наукой о материалах возникла уже проблема получения исходного сырья для получения материалов с заданными свойствами. Эта проблема особенно остро ощущается для некоторых развивающихся стран.

Утверждается, что материаловедение и теория технологии материалов «серьёзно повлияли на развитие наук о рисках безопасности ...действительно, если рассмотреть с позиций системной безопасности борьбу человека с природными рисками и действия человека в военно-политической сфере, его успехи в строительстве и транспорте и т.д., можно обнаружить, что прогресс во всех этих областях обычно обеспечивается применением новых материалов и соответственно новых методов их производства» [9]. В рамках действующей парадигмы развития человеческой цивилизации «именно отрасли промышленности, производящие материалы, являющиеся основой развития цивилизации XX в. заложили основу экологических кризисов и конечной гибели всего живого на Земле» [9]. Существующие подходы в материаловедении, по своей сути, не могут решить назревшие проблемы в области наук о материалах. В связи с этим потребовалось формирование нового научного направления (подхода) в области наук о материалах – энтропийно-экологической материалогии, т.е. третьего основного научного подхода. В отечественной литературе не имеется систематических сведений о новом векторе развития науки о материалах. В связи с этим в данной работе предпринята попытка сформулировать основные положения и методологические предпосылки энтропийно-экологической материалогии (ЭЭМ).

В связи с формированием нового направления науки о материалах возникла необходимость появления более обобщающей науки на базе материаловедения. В [17; 18; 21] предлагается обозначить её как «интеграционное материаловедение», мы предлагаем назвать материалогией [2; 7].

Материалогия, её цели и задачи

Появление нового научного направления в области наук о материалах (ЭЭМ), которое уже не отвечало в полной мере целям и задачам материаловедения, потребовало обратиться к более обобщающей науке и её новому определению, которое ранее было обозначено в [2] и названо материалогией. В связи с этим материалогия состоит из трёх основных разделов (см. рис. 3): эмпирического, структурно-аналитического, энтропийно-экологического. Если задачей эмпирического, структурно-аналитического является получение материалов с заданными свойствами, то задачей ЭЭМ является перманентное обеспечение

промышленности, производящей заданные материалы, минеральным сырьём в условиях экологической безопасности.



Рис. 3. Структура материаловедения и главные задачи основных направлений развития науки о материалах

Целью материаловедения является разработка теории и практики получения материалов с заданными свойствами в условиях устойчивого развития человеческого общества. Задача материаловедения – получение материалов и изделий с заданными свойствами в условиях рационального, комплексного использования минерального сырья, а также производственных и бытовых отходов с соблюдением экологической безопасности. Следует отметить, что в литературе, в том числе и отечественной, подробно и на высоком уровне рассмотрены проблемы, цели и задачи эмпирической, структурно-аналитической материаловедения, но данные по этим вопросам для ЭЭМ в литературе отсутствуют. Такой подход не способствует дальнейшему развитию науки о материалах и свидетельствует о непонимании стратегии её развития. Это может привести к ещё большему отставанию развития науки о материалах в России, по сравнению с её развитием в передовых странах.

Проблемы, цели и задачи ЭЭМ

Основные проблемы ЭЭМ определяются назревшими глобальными проблемами человечества и требованиями устойчивого развития: постоянное обеспечение промышленности (как в настоящее время, так и в будущем) минеральным сырьём, материалами при экологической безопасности для человечества и природы. Перед наукой о материалах возникла проблема получения исходного сырья для производства материалов с заданными свойствами. Эта проблема особенно остро ощущается для ряда развитых и развивающихся стран, вынужденных закупать все дорожающие минеральные ресурсы. Эти страны первыми обратились к проблеме изучения не только комплексного и рационального использования сырья и материалов, но и возможности получения сырья из бытовых и производственных отходов, что в перспективе имеет громадное значение для будущего человечества. Основой такого подхода к проблеме получения сырья и материалов из отходов является изучение циклического круговорота вещества и материалов (ЦКВМ) «во второй природе» [2; 5; 17; 21]. Изучение ЦКВМ получило распространение в развитых странах [17; 18; 21], и раздел, изучающий ЦКВМ, стал наиболее перспективным в учебниках по материалам, например в Германии [17; 18; 21]. Следовательно, целью ЭЭМ является разработка теории и практики рационального, комплексного использования сырья и отходов для получения материалов с заданными свойствами на основе изучения ЦКВМ «во второй природе» [5; 18; 21].

В связи с изложенным перед ЭЭМ возникла триединая задача, которая впервые обозначена в [14] применительно к горно-металлургическому комплексу и представлена нами с некоторыми дополнениями и изменениями для ЭЭМ (см. рис. 4). Перманентное

обеспечение минеральным сырьём (МС) может быть реализовано за счёт изыскания новых месторождений, переработки сбалансированного МС, рационального и комплексного его использования, разработки оборудования для этого, создания новых видов сырья с высокой реакционной способностью, а в будущем добычей МС на космических объектах.



Рис. 4. Задачи ЭЭМ

Перманентное обеспечение сырьём, полученным из отходов, обеспечивается за счёт рециркуляции материалов, переработки отходов горно-металлургического производства, создания центров по переработке бытовых и промышленных отходов, создания материалов с высоким уровнем свойств. Сохранение окружающей среды обеспечивается за счёт создания специального оборудования, использования замкнутого производства материалов, использования разомкнутого круговорота вещества и материалов. Таким образом, решение триединой задачи ЭЭМ требует комплексного подхода, включающего применение достижений геологии, горного дела, металлургии, физико-химии, обозначенных М.В. Ломоносовым в его основной работе [10].



Рис. 5. Методологическая схема ЭЭМ

Методологические основы ЭЭМ

Методология ЭЭМ состоит из ряда последовательных этапов, разработанных в соответствии с указаниями для частнонаучной методологии [8]:

- постановка проблемы;
- формулировка целей и задач;
- анализ данных литературы;
- на основании обобщений и выводов формулировка гипотез;
- экспериментальные и теоретические исследования;
- получение материалов из минерального сырья и отходов, их исследование с последующим практическим применением.

При разработке методологии нами использовалась парадигма: «состав-структура-технология-экология-свойства», основой методологии ЭЭМ являлось исследование ЦКВМ (см. рис. 5).

В результате анализа литературных данных были сформулированы две основополагающие гипотезы:

1) исследование движения сырья к материалам и отходам (ЦКВМ) позволяет системно рассмотреть и рекомендовать получение материалов из сырья и отходов в условиях устойчивого развития;

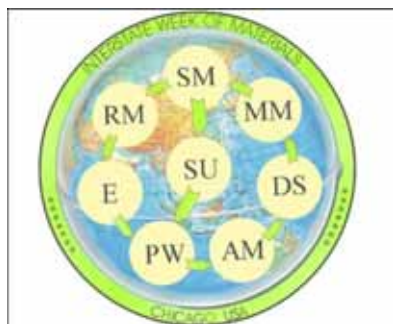
2) использование современных научно-технических достижений, и в частности концентрированных потоков энергии, позволяет создавать оборудование и технологии комплексной, рациональной переработки сырья для получения материалов в условиях устойчивого развития.

Циклический круговорот вещества и материалов во «второй природе»

ЦКВМ во «второй природе» является научной основой энтропийно-экологической материологии. Задачей ЭЭМ является решение триединой проблемы обеспечения сырьём, материалами и экологической безопасности во Благо человеческой цивилизации с использованием современных достижений науки и техники.

Исследование ЦКВМ за рубежом началось с изучения простейшей схемы замкнутого (на Землю) круговорота материалов, которая стала эмблемой «межгосударственной недели материалов» в г. Чикаго (США), 1996 г. (см. рис. 6, а).

а)



б)

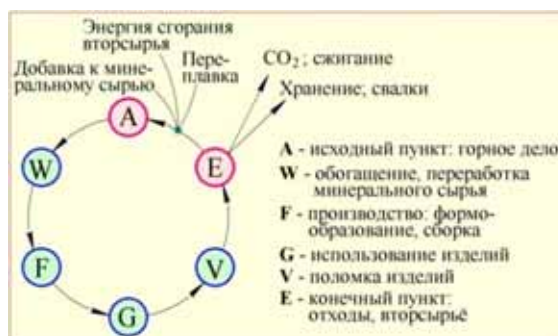


Рис. 6. Схема цикла полного использования материалов (а) [20], где SM – синтез материалов, RM – сырьё, E – Земля, PW – отходы, AM – применение в производстве, DS – подготовка производства, MM – производство материалов, SU – вторичное использование; шесть стадий ЦКВМ (б) [17; 18; 21]

Более развёрнутой стала схема, предложенная в работах [17; 18; 21], которая также являлась незамкнутой (см. рис. 6, б), состоящая из шести последовательных циклов (стадий),

и связана с перераспределением и изменением состава и структуры материи. Рассматриваются варианты, когда вся последовательность замыкается полностью, частично или не замыкается (см. рис. 7). То есть идеальным является создание изолированного, замкнутого производства материалов и изделий, когда отходы деятельности человечества не возвращаются на Землю, не создают «помех» сложившегося равновесного существования естественной природы. Разомкнутый ЦКВМ предполагает полное превращение природного материала в материал «второй», искусственно создаваемой человечеством природы.

а)



б)

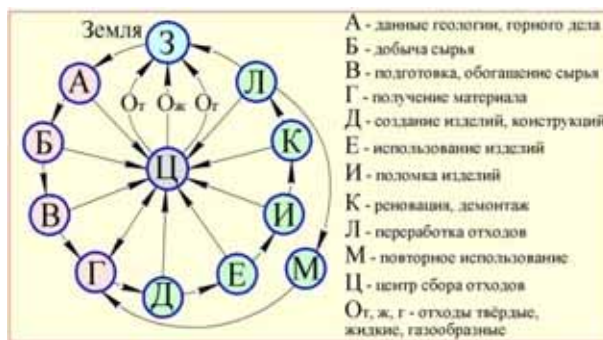


Рис. 7. Стадии ЦКВМ (а) по [17; 18; 21] и схема замкнутого цикла производства и использования вещества и материалов (б) [3]

Приведённые схемы ЦКВМ применительно к ресурсодобывающим регионам требуют дополнения в связи с важностью взаимосвязанных этапов: “геология → горное дело → подготовка сырья → металлургия”.

Следует отметить, что указанный комплекс дисциплин и связанных с ним исследований особенно важен для развития России и был основным предметом исследований М.В. Ломоносова [10] и В.И. Вернадского [1]. В связи с этим нами предложена схема (см. рис. 8) незамкнутого ЦКВМ, в которой также учитывается необходимость создания центра по добыче сырья и материалов из отходов производства, когда отходы используются полностью.



Рис. 8. Схема круговорота вещества и материалов

В работе ЦКВМ условно подразделен на четыре сектора (см. рис. 8):

- 1) энерго-сырьевой;
- 2) материаловедческий;
- 3) производства материальных благ, техники различного назначения;
- 4) экологический.

Рассмотрение проблемы энерго-сырьевого и материаловедческого секторов было начато работами М.В. Ломоносова [10].

Следует отметить, что прерогатива изучения различных секторов ЦКВМ для разных стран неодинакова. Для большинства развитых (например, Японии, Германии) особый интерес представляют последние три сектора. В то же время для большинства отсталых и развивающихся – энерго-сырьевой сектор, который представляет значительный интерес и для России. Каждая страна мечтала бы иметь полный ЦКВМ, и Россия, являющаяся по природным и энергетическим богатствам самодостаточной страной (по заявлению ряда руководителей и учёных РФ), имеет полную уверенность в этом.

Так как замкнутый ЦКВМ не отвечает требованиям снижения уровня влияния глобальных проблем человечества, то связи с этим представляет интерес ЦКВМ с незамкнутым циклом (см. рис. 9). Для осуществления незамкнутого цикла требуется принципиально новые технологии и оборудование, позволяющие полное и комплексное использование сырья в режиме безотходного производства материалов без нарушения экологического равновесия в природе. Уже в настоящее время возможны проектирование и создание плазменного котла для этих целей.

Таким образом, для снижения энтропии и экологической опасности необходимо использование новых технологий воздействия на вещество и материалы. Перспективно в этом отношении использование на этапе «Переработка МС» концентрированных потоков энергии (см. рис. 9).



Рис. 9. Незамкнутый (идеальный) ЦКВМ

Каждый из этапов имеет свой предмет исследования, свои задачи и цели и свою научную дисциплину, обеспечивающие их дальнейшее развитие и совершенствование. Развитие и совершенствование общего ЦКВМ в основном обеспечивают философия, химия, физика, экология, металлургия, машиностроение, экономика.

Энерго-сырьевой сектор – это область геологии, горного дела, химического восстановления концентратов. Металлургия, материаловедение эти вопросы практически не изучают, хотя уже в этом секторе возможно получение материалов. Энерго-сырьевой сектор особенно важен для изучения некоторых глобальных проблем и, в частности, катастрофического уменьшения не возобновляемых ресурсов, экологической опасности горных разработок, появления значительных отвалов, хвостохранилищ с большим содержанием вредных для человека химических соединений. С другой стороны, уже на этом этапе возможно получение различных материалов, что приведёт к сокращению общего пути ЦКВМ, а с другой – к развитию ресурсодобывающих регионов.



В связи с этим энерго-сырьевой сектор также должен стать объектом исследований материаловедения – получения материалов непосредственно из руды и концентратов с использованием высоких технологий в условиях устойчивого развития. Этапы Г, Д, П (см. рис. 8) являются прерогативой нового направления в области экспериментального материаловедения – материаловедения [2; 7]. Целью материаловедения является получение материалов и изделий из МС в регионе его добычи с использованием высоких технологий в условиях устойчивого развития человечества. Экспериментальные работы в этом направлении показали перспективность получения материалов, например материалов для сварочных, электродных, наплавочных электродов [3].

О критериях энтропийной и экологической безопасности ЦКВМ

В результате ЦКВМ происходят необратимые процессы в окружающей среде, что подчиняется законам термодинамики и является предметом экологии. Промышленное производство материалов и их использование от «рождения и до смерти» (от первоначального этапа преобразования до утилизации) приводят к появлению отходов, изменениям в биосфере. Происходит так называемое «тепловое» загрязнение атмосферы, изменяется её химический состав, а также почвы и воды, возникает радиоактивное загрязнение – всё это приводит к увеличению энтропии биосферы. Для достаточно закрытого процесса производства, например переработка отходов металлов, общее повышение энтропии будет небольшим. В случае открытого (например, добычи МС, сжигании углеродсодержащих веществ и материалов) энтропия резко увеличится, т.е. будет произведена максимальная неупорядоченность материи. Целью ЭМ является разработка и исследование закрытого типа производства материалов с заданными функциональными свойствами на всех этапах ЦКВМ.

Энтропия естественной природы S повышается от начального этапа ЦКВМ S_0 до конечного S_N , то есть на всех этапах технического процесса преобразования материи и создания «второй природы». Она характеризуется возникающим «беспорядком», «возмущением» окружающей среды, нарушением сложившегося равновесия в естественной природе. При этом учитывается не только использованная энергия, но и перераспределённая материя, например: CO_2 , CO_3 и другие газы, выделяющиеся в атмосферу, соли, соединения азота, тяжёлых металлов, загрязняющих воду, почву и т.д. Необходимо отметить о назревшей потребности в выработке критериев оценки направления человеческой деятельности в биосфере. Полагаем, что таким критерием может быть оценка суммарной энтропии биосферы как соотношения произведённой энтропии в естественной и «второй» природе (процессов «созидания-разрушения»). Для каждого этапа ЦКВМ энтропия должна быть определена. Например, для «G-V» (см. рис. 6, б) предлагается использовать соотношение [17]

$$T_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{э}} \cdot t_{\text{у}}}{S_N} = \max,$$

где $T_{\text{ц}}$ – длительность цикла; $P_{\text{э}}$ – уровень эксплуатационных свойств материала, отвечающих его функциональному назначению; $t_{\text{у}}$ – продолжительность эксплуатации; S_N – энтропия цикла N .

Если зарождение материи, феномен эволюции биологической и разумной жизни отождествлять с упорядочением, следствием развития материи, то созидательные процессы, разумную деятельность человечества по производству материальных и духовных благ, движению от биосферы к ноосфере [1], вероятнее всего, также можно связать с упорядочением материи и снижением энтропии. В зависимости от чётко сформулированного и глубоко продуманного функционального назначения материала, направленного на осуществление созидательных процессов и средств устойчивого развития человечества, по нашему мнению, может возрастать упорядоченность материи созданием «второй природы» из произведённого материала в условиях рационального производства. Может быть

поставлен вопрос о научных критериях оценки упорядоченности в сравнении с производимым при этом «возмущением» естественной природы, так как в настоящее время, очевидно, процессы разрушения преобладают. Процессы преобразования природы неизбежно сопровождаются значительным влиянием на её равновесное состояние и изменение энтропии. Можно предположить, что преобразование материи и получение требуемых материалов и изделий в биосфере могут определяться суммарным количеством произведённой в ней энтропии S_{Σ} :

$$S_{\Sigma} = (S_E + S_B) < 0,$$

где S_E – энтропия, произведённая в естественной природе; S_B – во «второй».

Для выполнения этого условия энтропия, произведённая в естественной природе, должна быть минимальной, во «второй» – отрицательной:

$$S_E \rightarrow 0; S_B \rightarrow (-\infty).$$

В этих условиях для каждого этапа ЦКВМ, например «G-V», энтропия должна уменьшаться от сокращения длительности T_u и увеличения времени эксплуатации конечного продукта t_u при повышении его эксплуатационных свойств P_{Σ} :

$$S_N = \frac{T_u}{P_{\Sigma} \cdot t_u} \rightarrow \min.$$

Начальная S_0 и конечная энтропии S_N :

$$0 < \frac{S_0}{S_N + S_0} < 1,$$

а также критерии оценки должны определяться на базе научно обоснованных экологических, экономических, политических и правовых норм, поддерживающих этику окружающей среды. То есть в процессе ЦКВМ вещество (материал) изменяет свою форму, размеры, состав, структуру при всё возрастающем потреблении энергии, и суммарная энтропия биосферы не только увеличивается за счёт «возмущающих» отходов при разрушении естественной природы, но, возможно, должна уменьшаться за счёт направленного, созидательного производства и эксплуатации «второй природы».

Следовательно, все этапы («шаги») ЦКВМ связаны с перераспределением материальных и энергетических потоков для каждого этапа ЦКВМ и могут характеризоваться энтропийными балансами. Для каждого этапа («шага»), например, первого, изменение энтропии можно записать как:

$$S_0 - S_A = \int_0^A \frac{\partial Q}{T},$$

где S_0 – энтропия начального этапа ЦКВМ (точка 0); S_A – энтропия в конце 1-го этапа ЦКВМ; ∂Q – количество теплоты, сообщённой системе; T – температура.

Следует отметить, что внутри каждого этапа выполняется ряд технологий, каждая из которых требует учёта влияния на энтропийную и экологическую безопасность биосферы. В связи с тем, что расчёт энтропии для каждого этапа и всего ЦКВМ представляет значительные сложности, а критерии оценки разумной деятельности по преобразованию и упорядочению материи не разработаны, предлагается решение проблемы энтропийной безопасности разделить на два направления:

- 1) энергетическое,
- 2) вещественное.

При энергетическом направлении производится учёт энергии на единицу объёма (массы) добываемого МС и получаемого функционального материала:

$$K_V = E/V,$$

где K_V – коэффициент учёта энергии на единицу объёма; E – энергия, затраченная на добычу



МС, его подготовку, получение концентратов; V – единица объёма (массы) полученного материала.

Эти данные, отнесённые к одной технологии, одному этапу, ряду этапов или всему ЦКВМ, могут сравниваться с известными (или расчётными). Определяем эффективность использования энергии:

$$K_E = K_N / K_{И},$$

где K_E – эффективность использования энергии отдельной технологии или на определённом этапе ЦКВМ; K_N – количество затраченной энергии; $K_{И}$ – то же для лучших мировых достижений (расчётных данных).

В этом случае $K_E > 1$ – неэффективное использование энергии, приводящее к повышению S , при $K_E \leq 1$ – эффективное использование энергии, приводящее к стабилизации или уменьшению S .

При вещественном направлении производится учёт вещества, поступающего в атмосферу, почву, воду при получении и использовании материалов на каждом этапе ЦКВМ. При этом происходит повсеместное загрязнение мусором, в некотором случае опасность генерации шума, образования техногенных массивов. С привлечением предельно допускаемых значений концентрации (ПДК), известных практически для всех элементов и соединений, при выполнении каждой технологии или этапа ЦКВМ необходимо осуществлять определение загрязнения атмосферы, почвы, воды. Данные последних сопоставлять с допускаемыми гигиенических нормативов, санитарных норм и правил, ПДУ и т.д.:

$$K_B = K_D / \text{ПДК},$$

где K_B – коэффициент загрязнения атмосферы, почвы, воды определённым элементом или соединениями; K_D – действительное содержание элемента или соединений в атмосфере, почве, воде; ПДК – предельно допустимая концентрация элементов или соединений в атмосфере, почве, воде.

При $K_B > 1$ система обладает экологической опасностью, при $K_B \leq 1$ система обладает экологической безопасностью.

На основании вышесказанного можно предположить, что коэффициент энтропийной и экологической безопасности соблюдается при

$$K_{\Sigma} = K_E \cdot K_B \leq 1.$$

Выводы

1. Предложено новое направление в науке о материалах – энтропийно-экологическое, заключающееся в необходимости учёта и решения глобальных проблем человечества в условиях устойчивого развития. Обоснованы цели и задачи ЭЭМ.

2. Показано, что научной основой энтропийно-экологической материалогии является исследование ЦКВМ на каждом этапе «жизнедеятельности» материалов. Предложена методология ЭЭМ.

3. Показано, что для ресурсодобывающих регионов важнейшим является исследование начального этапа ЦКВМ (дуга Ломоносова), позволяющего решать проблему получения материалов в регионе его добычи и проблему триединой задачи ЭЭМ.

4. Предложены критерии энтропийной и экологической безопасности ЦКВМ, заключающиеся в учёте энергетического воздействия на вещество при получении материала с учётом изменения вещественного содержания элементов и соединений в окружающей среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский, В. И. Размышление натуралиста. Кн. 2 / В. И. Вернадский. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
2. Верхотуров, А. Д. Материалогия / А. Д. Верхотуров // Вестник ДВО РАН. – 2004. – № 5. – С. 80-86.
3. Верхотуров, А. Д. Некоторые стратегические цели и задачи рационального природопользования в условиях ДВ региона / А. Д. Верхотуров, Б. А. Воронов, Л. А. Коневцов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы обработки материалов и заготовительных производств». – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2010. – С. 267-274.
4. Верхотуров, А. Д. О новом определении науки в связи с необходимостью решения глобальных проблем человечества / А. Д. Верхотуров, Б. А. Воронов, Л. А. Коневцов // Сб. междунар. симпоз. «Современное материаловедение и нанотехнологии». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – С. 30-38.
5. Верхотуров, А. Д. Международная конференция «Неделя материалов» / А. Д. Верхотуров, И. В. Сокол // Вестник ДВО РАН. – 1995. – № 1. – С. 110-111.
6. Верхотуров, А. Д. Некоторые вопросы современного состояния и перспективы развития материаловедения / А. Д. Верхотуров, В. С. Фадеев. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 320 с.
7. Верхотуров, А. Д. Введение в материалогия / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилёв. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 780 с.
8. Верхотуров, А. Д. Предмет исследования, концептуальные и методологические основы становления и развития материалогии / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилёв, Л. А. Коневцов // Химическая технология. – 2008. – № 5. – С. 197-204.
9. Вишняков, Я. Д. Новая парадигма третьего тысячелетия / Я. Д. Вишняков // Экономика и жизнь. – 1994. – № 24. – С. 17.
10. Полное собрание сочинений Михаила Васильевича Ломоносова. Ч. IV-VI. – Санкт-Петербург: Имперская Академия наук, 1803. – 302 с.
11. Неорганическое материаловедение. Основы науки о материалах / ред. Г. Г. Гнесин, В. В. Скороход. – Киев: Наукова думка, 2008. – 1152 с.
12. Атомистическое моделирование материалов / В. В. Покропивный, Ю. И. Роговой, В. В. Огородников, А. А. Лисенко. – Киев: ИПМ им. И. Н. Францевича НАН Украины, 2008. – 240 с.
13. Ратнер, М. Нанотехнология / М. Ратнер, Д. Ратнер. – М.: Вильямс, 2004. – 240 с.
14. Резниченко, В. А. Материалы и сохранение окружающей среды – новая модель развития производства / В. А. Резниченко // Материаловедение. – 1997. – № 4. – С. 40-44.
15. Самсонов, Г. В. Электронная локализация в твёрдом теле / Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 338 с.
16. Тананаев, И. В. Основные этапы развития неорганического материаловедения в СССР / И. В. Тананаев. – Киев: Наук. Думка, 1983. – С. 8-29.
17. Hornbogen E. Werkstoffe. Springer-verlag Berlin Heidelberg: Printeg Germany, 2006. – 460 p.
18. Hornbogen E., Eggeler G., Werner E. Werkstoffe. Springer-verlag Berlin: Heidelberg, 2008. – 594 p.
19. JOM'S The Greatest Moments in Materials' Science and Engineering // JOM, N2. 2006. – pp.1-8.
20. Van L., Vlack H. Materials Science for Engineers. The University of Michigan, 1975. – 425 p.
21. Werner E., Hornbogen E., Jost N., Eggeler G. Fragen und Antworten zu Werkstoffe: Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 2010.

Свиридов А. В., Куриный В. В.

A. V. Sviridov, V. V. Kuriny

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

MATHEMATICAL MODELLING OF PHYSICAL MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTROPHORETIC FOUNDRY MOULDS



Свиридов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Andrey V. Sviridov – PhD in Engineering, Assistant Professor at the Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.



Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Vladislav V. Kuriny – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Аннотация. Статья подготовлена в рамках участия автора в гранте Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4591.2012.8.

Материал статьи содержит данные о влиянии различных технологических факторов на свойства электрофоретических оболочковых форм, результаты математического моделирования формирования прочности оболочковых форм, изготовленных методом электрофореза и анализ полученных данных.

Summary. The paper has been prepared thanks to the Russian President's Support Program for Young Scientists, award No. MK-4591.2012.8. The paper presents data on how various process-related factors impact the properties of electrophoretic shell moulds, and offers results of mathematical modeling of the strength of shell-moulds produced by electrophoresis; all the findings are analyzed.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрофорез, оболочковая форма, физико-механические свойства.

Key words: mathematical modeling, electrophoresis, shell-mould, physical mechanical properties.

УДК 621.74.045

Качество и свойства получаемых методом электрофореза оболочковых форм (ОФ) зависят от многих технологических параметров, к числу которых можно отнести величину приложенного к модельному блоку и электролизеру напряжения, время нанесения осадка и сушки токопроводного слоя, плотность используемого связующего и другие.

В случае использования модельных композиций на основе парафина повышение напряжения при электрофоретическом формообразовании может приводить к размягчению

поверхности модельных блоков и даже локальному расплавлению модельного состава из-за нагрева токопроводящего покрытия в зоне его контакта с металлическим электродом. При изготовлении ОФ на моделях из легкоплавких металлических сплавов величина напряжения может достигать больших значений, без заметного нагрева модели [1]. В данном случае применяли модельный состав марки ПС-50/50, а разность потенциалов не превышала 50 – 70 В.

Температура сушки электропроводного слоя и сформированной оболочки ограничена температурой размягчения модельного состава, и, согласно рекомендациям, приведенным в [2], модельные блоки с нанесенным токопроводящим слоем сушили при температуре не более 30 °С. В качестве связующего использовали жидкое стекло с плотностью 1,32 – 1,36 г/см³.

Для получения математических моделей, позволяющих прогнозировать физико-механические свойства ОФ на стадии выплавки модельного состава и заливки оболочек металлом, был поставлен полный факторный эксперимент (ПФЭ). Для проведения ПФЭ была составлена матрица планирования и карта проведения эксперимента по известной методике [3]. При этом варьируемыми факторами были следующие:

- напряжение на электролизере (X_1), В;
- время сушки токопроводящего покрытия (X_2), мин;
- плотность связующего (X_3), г/см³.

За основной уровень (X_0) были приняты значения: 60 В, 60 мин и 1,34 г/см³ соответственно, а интервал варьирования составил: 10 В, 20 мин и 0,02 г/см³.

В качестве выходных характеристик были выбраны прочности образцов ОФ при статическом изгибе до и после прокаливания.

По результатам исследований были построены математические модели, позволяющие прогнозировать прочность ОФ до (Y_1) и после (Y_2) прокаливания, МПа:

$$Y_1 = 3,46 + 0,25 \left(\frac{x_1 - 60}{10} \right) + 0,38 \left(\frac{x_2 - 60}{30} \right) + \left(\frac{x_3 - 1,35}{0,02} \right) + 0,2 \left(\frac{x_1 - 60}{10} \right) \left(\frac{x_2 - 60}{30} \right) +$$
$$+ 0,14 \left(\frac{x_1 - 60}{10} \right) \left(\frac{x_3 - 1,35}{0,02} \right) + 0,22 \left(\frac{x_2 - 60}{30} \right) \left(\frac{x_3 - 1,35}{0,02} \right) + 0,24 \left(\frac{x_1 - 60}{10} \right) \left(\frac{x_2 - 60}{30} \right) \left(\frac{x_3 - 1,35}{0,02} \right),$$
$$Y_2 = 6,564 + 0,186 \left(\frac{x_1 - 60}{10} \right) + 0,149 \left(\frac{x_2 - 60}{30} \right) + 1,096 \left(\frac{x_3 - 1,35}{0,02} \right).$$

Воспроизводимость опытов определяли, сравнивая рассчитанные значения критерия Кохрена (0,757 для Y_1 и 0,284 для Y_2) с табличным (в нашем случае 0,816). Опыты равноточны, если полученные значения меньше табличных, т.е. условие равноточности выполняется.

Адекватность моделей проверяли, сравнивая расчетные значения критерия Фишера (0,28 для Y_1 и 2,33 для Y_2) с табличным (6,04), который зависит от числа степеней свободы и уровня значимости (0,05) [3]. Полученные данные говорят об адекватности построенных моделей.

Среднее повышение прочности непрокаленных электрофоретических образцов, полученных при 50 В, связанное с увеличением времени сушки токопроводящих слоев с 40 до 80 мин составило 10 – 15 %, что сохраняется при всех значениях плотности связующего.



При 60 В на электролизере повышение прочности образцов ОФ зависит не только от увеличения времени сушки токопроводных слоев (с 40 до 80 мин), но и от плотности связующего (на 20 % для силиката натрия с плотностью $1,32 \text{ г/см}^3$ и на 32 % для жидкого стекла с плотностью $1,36 \text{ г/см}^3$).

При подаче на электролизер напряжения, равного 70 В, увеличение времени сушки токопроводных слоев с 40 до 80 мин приводит к еще более значительному повышению прочности электрофоретических образцов ОФ (на 25 % для связующего с плотностью $1,32 \text{ г/см}^3$ и на 50 % для силиката натрия с плотностью $1,36 \text{ г/см}^3$).

При 50 – 70 В на электролизере повышение прочности прокаленных керамических образцов ОФ, происходящее с увеличением времени сушки токопроводящих слоев с 40 до 80 мин составляет около 5 – 6 %, что справедливо для всех значений плотностей связующего.

Максимальные значения прочности электрофоретических образцов ОФ до прокаливания (3,4 МПа) и после прокаливания (5,2 МПа) наблюдаются при 70 В на электролизере и соответствуют использованию токопроводящего покрытия со временем сушки равным 80 мин и применению связующего с плотностью $1,36 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, если до прокаливания роль таких факторов, как напряжение, время сушки и плотность связующего, в формировании прочности ОФ значительна, то после прокаливания их влияние на физико-механические свойства сводятся к минимуму [4; 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2259255 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Способ получения керамических форм методом электрофореза / В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, А. В. Свиридов; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КНАГТУ». – № 2003137719/02; заявл. 26.12.2003; опубл. 27.08.2005, Бюл. № 24. – 3 с.
2. Иванов, В. Н. Литье по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов, С. А. Казеннов; под общ. ред. Я. И. Шкленника. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
3. Цымбал, В. П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии: учеб. для вузов / В. П. Цымбал. – Кемерово; М.: Издательское объединение “Российские университеты”: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2006. – 431 с.
4. Свиридов, А. В. Изготовление оболочковых литейных форм с использованием электрофореза / А. В. Свиридов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 61-66.
5. Свиридов, А. В. Сушка оболочковых форм, изготовленных методом электрофореза / А. В. Свиридов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 101-103.

Лиманкин В.В., Ким В.А., Марьин Б.Н., Сухоплюев В.А., Марьин С.Б., Шпилёв А.М., Дмитриев Э.А.

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ
ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОМ ОТЖИГЕ**

**Лиманкин В. В., Ким В. А., Марьин Б. Н., Сухоплюев В. А., Марьин С. Б.,
Шпилев А. М., Дмитриев Э. А.**

**V. V. Limankin, V. A. Kim, B. N. Maryin, V. A. Sukhoplyuev, S. B. Maryin,
A. M. Shpilev, E. A. Dmitriev**

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ
СТАЛЕЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОМ
ОТЖИГЕ**

**QUANTITATIVE ASSESSMENT OF ENGINEERING STEEL'S GRANUALTED
STRUCTURE DURING PLASTIC DEFORMATION AND RECRYSTALLIZATION
ANNEALING**

Лиманкин Владимир Васильевич – генеральный директор управляющей организации ООО «Сибирско-Амурский металл» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: amurmetal@amurmetal.ru.

Mr. Vladimir V. Linmankin – Director General of the managing company ООО "Sibirsko-Amursky Metall" (LLC Siberian-Amurian Metal). E-mail: amurmetal@amurmetal.ru.

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of Engineering, Head of Department of Materials and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russian, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Сухоплюев Владислав Анатольевич – начальник производственного отдела ОАО «Амурметалл» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: suholuevva@amurmetal.ru.

Mr. Vladislav A. Sukhoplyuev – Chief Production Manager, ОАО (JSC) «Amurmetall». E-mail: suholuevva@amurmetal.ru.

Марьин Сергей Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Sergey B. Maryin – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Шпилев Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilev – Doctor of Engineering, Professor, Rector of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.



Mr. Eduard A. Dmitriev – Doctor of Engineering, Head of the Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается эволюция зеренной структуры при пластической деформации и рекристаллизационном отжиге конструкционных сталей, приводится методика количественной оценки зеренной структуры.

Summary. The paper deals with the evolutions of granulated engineering steel structure during plastic deformation and re-crystallization annealing; a method is presented for quantitative assessment of a granulated structure.

Ключевые слова: механические и физико-химические свойства, зеренная структура, количественный параметр организации структуры, пластическая деформация, отжиг.

Key words: mechanical and metallurgical properties, granulated structure, quantitative variable of steel structure, plastic deformation, annealing.

УДК 621.77

Введение

Механические и физико-химические свойства металлов и сплавов в значительной степени определяются структурой материала, важным элементом которой являются границы зерен и раздела фаз [1]. Границы зерен представляют замкнутый двумерный дефект кристаллического строения, состоящий из комбинации дислокаций, нанокристаллических и аморфных фаз, и отличаются повышенной плотностью концентраторов напряжений микромасштабных уровней, которые играют активную роль в развитии источников и стоков различных дефектов кристаллического строения, при этом сама граница является активным барьером перемещения дислокаций.

Протяженность границ определяется размером зерен и влияет на механические и физико-химические свойства материала. Роль этого параметра в обеспечении прочностных свойств материала отражает закон Холла-Петча [1]. Предел текучести и напряжение течения увеличиваются с уменьшением размера зерна не из-за наличия границы самой по себе, а из-за взаимодействия между кристаллитами, разделенными этой границей. Если дислокации надежно задерживаются границей и возможности для эстафетной передачи деформаций ограничены, то деформации локализуются в микрообъемах и напряжения течения возрастают. Локализация деформаций повышает концентрацию напряжений, что приводит к преждевременному разрушению и снижению пластичности металла. С уменьшением размера зерна облегчается переход линейного дефекта из одного кристаллита в другой, при этом наблюдается заметное повышение прочности при сохранении достаточно высокой пластичности [2].

Развитие зеренной структуры проявляется в миграции границ. Учитывая, что в структуре границ весомую роль играют краевые дислокации, скорость миграции границ будет определяться активностью дислокационных перемещений. Механизм дислокационных перемещений зависит от характера воздействия на материал. При деформационном воздействии перемещение краевых дислокаций осуществляется путем скольжения, а при тепловом – переползанием [4].

Пластическая деформация металлов и сплавов сопровождается выделением тепла, поэтому динамика зернограницных дислокаций включает как их скольжение, так и переползание. Процессы рекристаллизационного отжига представляют чисто тепловое воздействие, и миграция границ в этом случае связывается только с дислокационным переползанием. Скольжение дислокаций заключается в разрыве атомарной связи в кристаллической решетке и ее восстановлении со смещением на величину параметра решетки или вектора Бюргерса, а

перемещение – с диффузией атомов. Энергия активации в последнем случае адекватна энергии активации самодиффузии.

Статья посвящена сравнительному анализу количественной оценки микроструктуры, базирующейся на компьютерных технологиях обработки изображений, и изменению интерфейса структурного состояния при пластической деформации и рекристаллизационном отпуске.

Количественные характеристики для оценки интерфейса структурного состояния

Согласно ГОСТ 5639-65, численным показателем поликристаллических материалов является балл зерна, который для углеродистых сталей определяется по количеству кристаллитов на одном квадратном миллиметре по формуле

$$B = \log_2 n - 3, \quad (1)$$

где B – балл зерна; n – количество зерен на одном квадратном миллиметре.

Балл зерна не учитывает многие особенности структурной организации, такие как форма кристаллита, характер распределения диаметрального размера зерен, степень развитости границ и др.

Современные компьютерные технологии обработки видеoinформации позволяют численно оценивать изображения микроструктур, из которых можно создавать различные количественные комплексы, отражающие интерфейс структурного состояния материала. Физический смысл количественных показателей микроструктур должен раскрывать состав, строение и свойства материала. Универсальным методом обоснования количественных показателей является термодинамический подход.

Условие равновесности структуры определяется стремлением ее свободной энергии к минимуму, в приложении к замкнутым границам раздела поликристаллического материала это условие представляется [4] как

$$\Delta F = \sum_{i=N} (S \cdot \gamma - V \cdot \mu)_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

где S и V – площадь поверхности и объем i -го микроструктурного образования; γ и μ – удельная поверхностная энергия и химический потенциал; N – общее количество микрообъектов в заданном объеме.

Площадь поверхности микрообъекта можно представить фрактальным соотношением [5]

$$S \propto \Delta^D, \quad (3)$$

где Δ – средний диаметральный размер кристаллита; D – фрактальная размерность границы зерна.

Из (2) с учетом (3) вытекает соотношение, соответствующее условию развития наиболее равновесной зеренной структуры:

$$Q_C = \sum_{i=N} \left(\frac{D}{3} \cdot \frac{S}{V} \right)_i \propto \frac{\mu}{\gamma}. \quad (4)$$

Полученная зависимость является количественным показателем организации зеренной микроструктуры (Q_C), соответствующим минимуму приращения свободной энергии, который определяется соотношением химического потенциала к удельной поверхностной энергии границы.

Металлографический шлиф представляет срез объемной структуры материала в некоторой плоскости сечения, поэтому показатель Q_C , в приложении к плоскостному отображению структуры, принимает вид

$$Q_c = \sum_{i=N} \left(\frac{D_{\Gamma}}{2} \cdot \frac{P_3}{S_3} \right)_i, \quad (5)$$

где D_{Γ} – фрактальная размерность границы раздела; P_3 и S_3 – периметр и площадь микрообъекта в плоскости металлографического шлифа.

Показатель Q_c в отличие от балла зернистости учитывает не только размерное распределение зерен, но их форму и локальную кривизну самой границы, поэтому является более точным количественным параметром интерфейса структурного состояния. По изменению показателя Q_c можно анализировать процесс миграции границ. Рост размера кристаллита связывается с поглощением одного зерна другим за счет смещения границ в направлении от большего химического потенциала к меньшему, при этом плотность границы и фрактальная размерность уменьшаются. Показатель Q_c также уменьшается.

Современные компьютерные средства обработки изображений позволяют определять по цифровым фотографиям мезо- и микроструктур все необходимые количественные характеристики для расчета показателя Q_c .

Методика исследования

Микроструктура определялась на микроскопе «Микро-200» при 400- и 1000-кратном увеличении. Полученные цифровые фотографии обрабатывались с помощью специальной программы Image.Pro.Plus.5.1. Процедура обработки микроструктур включала корректировку контраста, выделение границ зерен и границ раздела фрагментированных элементов, пространственную калибровку в соответствии с кратностью увеличения, измерение площади (S_3) и периметра (P_3) каждого микроструктурного образования и фрактальную размерность границ (D_{Γ}). На одной фотографии микроструктуры фиксировалось от 400 до 4500 объектов микроструктуры. По полученным результатам вычислялся количественный показатель организации структуры Q_c по формуле (4).

Пластическая деформация образцов цилиндрической формы диаметром 5,0 мм и длиной 120 мм из стали 20 проводилась на универсальной разрывной машине INSTRON-3382. Исследованию подвергались микроструктуры поперечных сечений образцов, вырезанные в центральной области, в зонах неоднородной локализованной деформации или по месту разрыва.

Рекристаллизационный отжиг проводили при нагреве предварительно деформированного образца в муфельной печи при температуре 600 °С. Длительность нагрева составляла 15 мин, 1 ч и 2 ч с последующим охлаждением в воде.

Результаты исследования и их анализ

На рис. 1 представлены результаты обработки микроструктуры стали 3сп после отжига в виде кривых распределения зерен по баллам. В первом случае использовалась стандартная процедура определения балла по средней величине диаметрального размера зерна, вычисляемого методом секущих хорд, а во втором – по параметру Q_c с использованием компьютерных программ. Видно, что средний балл зерна принимает близкое значение независимо от методики его определения, но во втором случае диапазон фиксируемых микроструктурных объектов значительно шире и включает область мелкодисперсных образований выше 12-го балла, которые трудно идентифицировать визуально (см. рис. 1).

Балл зернистости не учитывает субмикроструктурные и точечные компоненты, доля которых в объемном соотношении может быть небольшой, но их роль с точки зрения стабилизации дислокаций и границ зерен весома. В среднем из всего количества зафиксированных объектов на одной фотографии микроструктуры доля субмикроструктурных и точечных компонентов составляет более 50 %. Скопления ультрадисперсных зерен происходят в зонах, где локальная кривизна границ принимает высокие значения, а оставшиеся крупные зерна отличаются относительно сглаженными очертаниями.

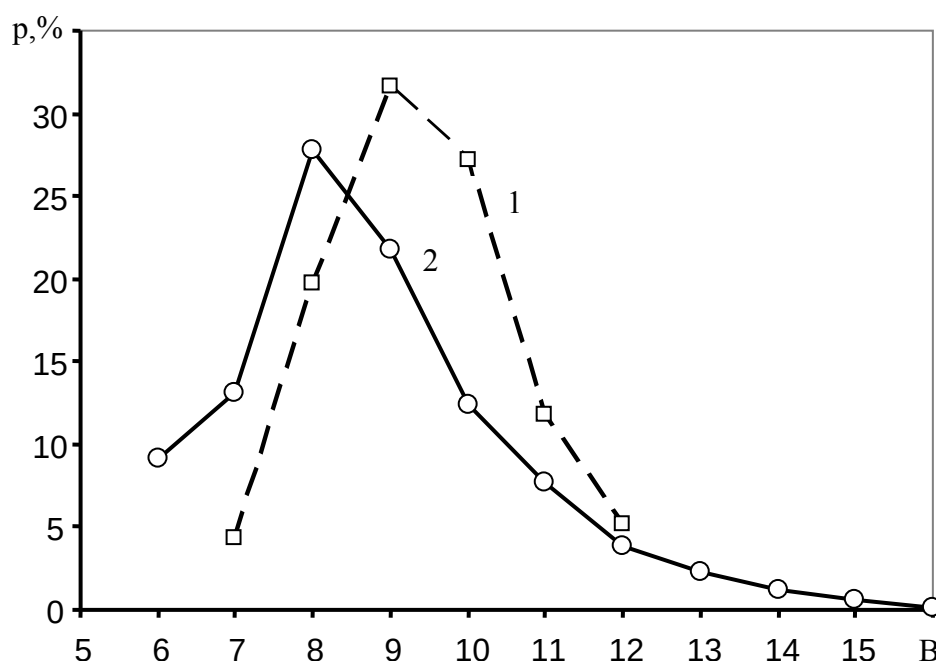


Рис. 1. Распределение зерен по баллам в микроструктуре конструкционной стали 3сп после отжига: 1 – стандартная методика определения; 2 – с использованием параметра Q_c

На основании изложенного можно заключить, что параметр Q_c адекватно отражает интерфейс структурного состояния, хорошо коррелирует со стандартным баллом зерна и несет при этом большую информацию о зеренной границе.

В зависимости от степени пластической деформации структурная динамика материала происходит за счет изменения формы, разбивки зерен и их ротационных смещений. В этом случае дробление зерен, как правило, происходит в зонах, примыкающих к участкам границ с высокой локальной кривизной. В результате ротационного смещения крупных зерен их форма приобретает гладкие выпуклые очертания, но сама линия границ становится более развитой за счет образования «ротационных вихрей». Все это приводит к росту количества субмикроструктурных объектов, но их доля в общем объеме материала незначительна, они слабо идентифицируются оптической металлографией и не учитываются при определении балла зерна. Параметр организации структуры учитывает эти изменения и увеличивается из-за повышения плотности границ и их фрактальной размерности.

На рис. 2 представлены микроструктуры образцов из стали 45 до и после пластической деформации при растяжении. Можно констатировать, что микроструктура после деформации отличается более мелким зерном с развитыми границами и высокой плотностью точечных объектов. Распределение точечных объектов при малой степени деформации носит неоднородный характер по объему кристаллита. С повышением степени деформации их плотность возрастает, а распределение становится более однородным. По оптическому изображению микроструктур трудно идентифицировать природу точечных образований, которые могут представлять выходы дислокаций, субмеккодисперсные частицы второй фазы или дефекты травления. В любом случае высокая степень травления указывает на химическую активность этих зон, которые представляют наномасштабные концентраторы напряжений и в целом характеризуют структуру материала с более высокой удельной свободной энергией.

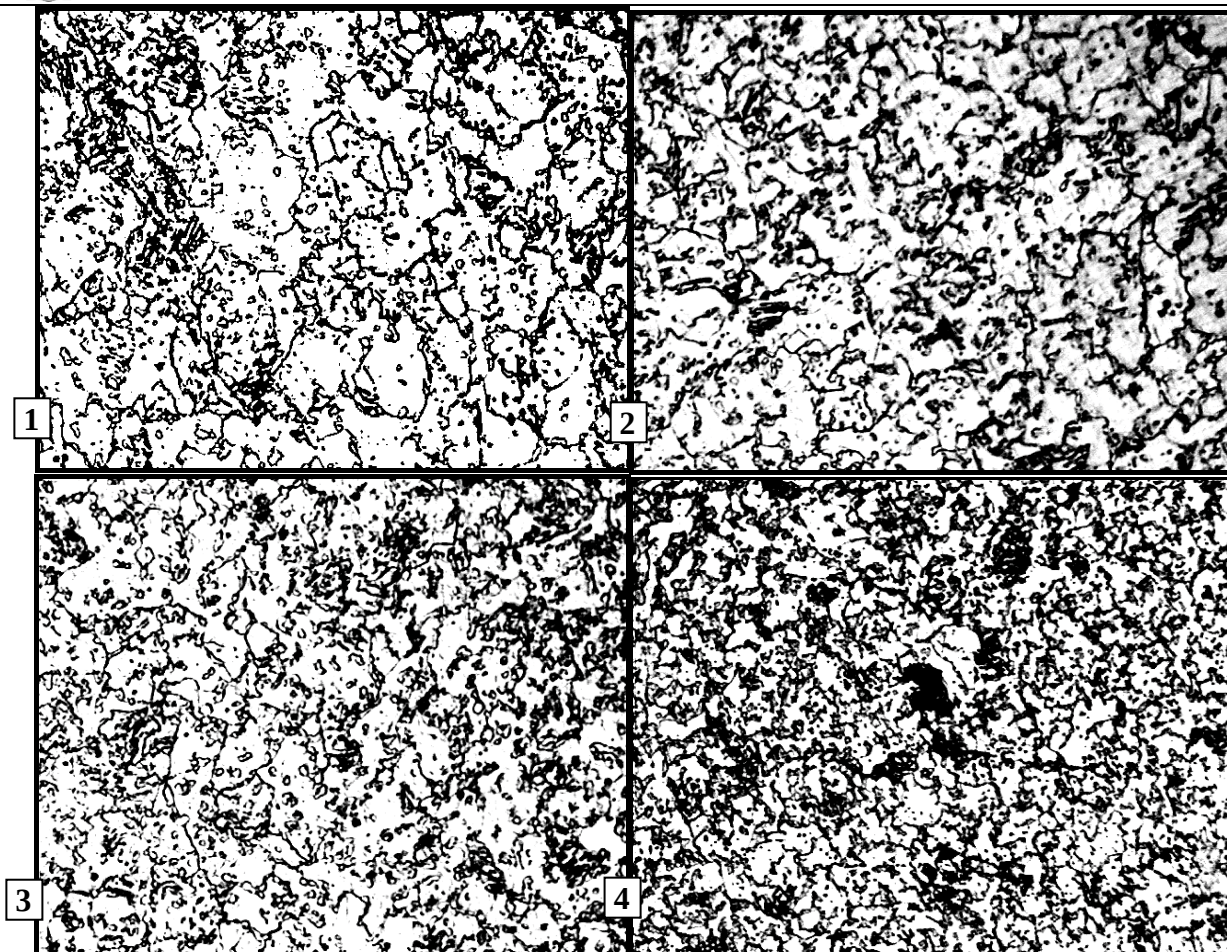


Рис. 2. Микроструктура образцов из стали 20 до и после растяжения: 1 – исходная структура; 2 – пластическая деформация 5 %; 3 – пластическая деформация 20 %; 4 – пластическая деформация 30 % (x400)

Изображенные микроструктуры фиксировались в поперечном сечении растягиваемых образцов, поэтому текстура деформации не проявляется.

Степень когерентности межзеренных границ можно косвенно оценить по их толщине с наличия участков разрыва. Нарушение когерентности рассматривается как способность структуры накапливать свободную энергию, поэтому с повышением степени деформации наблюдается формирование более четких границ раздела. При 30 % степени деформации появляется больше межзеренных границ с прямолинейными участками и разрывами. Участки разрыва указывают на наличие в структуре границ зон с повышенной когерентностью между кристаллографической ориентацией соседних зерен, а прямолинейные участки представляют плоскости межзеренного скольжения.

Пластическая деформация не привела к существенному изменению балла зерна, средняя величина которых осталась на уровне 8...9 класса, а параметр организации структуры Q_c более чем в два раза повысился с ростом степени деформации до 30 % (см. рис. 3). Это еще раз подтверждает более высокую количественную информативность параметра организации структуры по сравнению с баллом зерна.

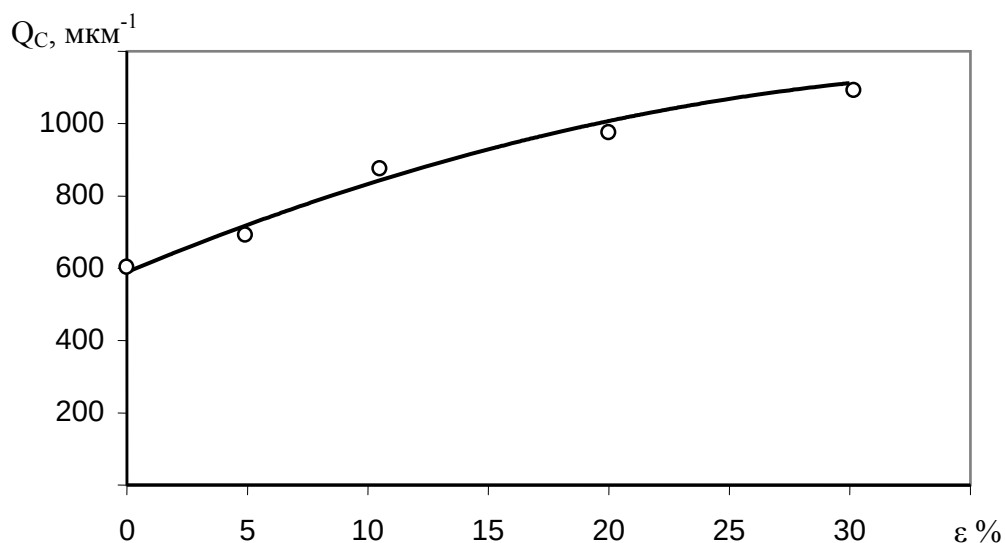


Рис. 3. Влияние степени деформации при растяжении на параметр организации структуры

На рис. 4 показано влияние длительности рекристаллизационного отжига на параметр организации микроструктуры Q_c , которая отображает кинетику структурных изменений при термическом воздействии. Начальный участок, где практически не наблюдается изменение параметра Q_c , называется период активации. Продолжительность этого периода связана с накоплением тепловой энергии, необходимой для диффузии атомов матрицы, формирования новых центров перекристаллизации и миграции границ [3].

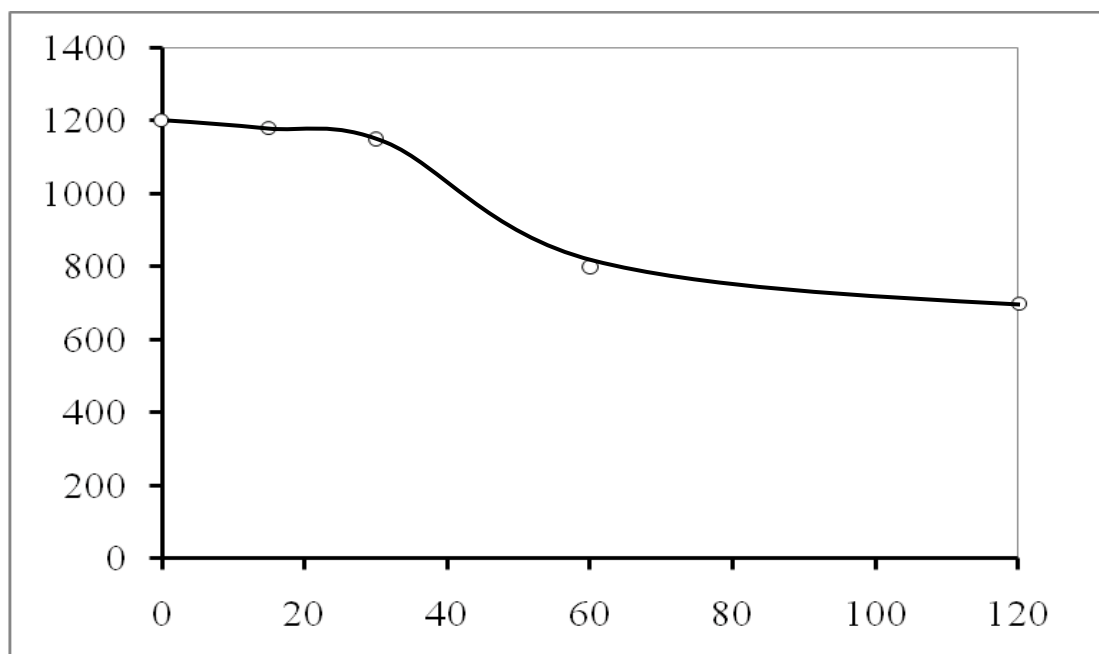


Рис. 4. Влияние длительности рекристаллизационного отжига на параметр организации структуры

Снижение и стабилизация кривой в диапазоне от 30 до 120 мин отражает динамику процесса первичной рекристаллизации. Изменение параметра Q_c связано ростом зерен за счет поглощения одного кристаллита другим, при этом форма зерна приобретает более равноосную конфигурацию.



Заключение

1. Предложенный количественный параметр организации структуры является более информативным и чувствительным по сравнению с баллом зерна, так как учитывает размерное распределение всех микроструктурных объектов, зафиксированных в поле объектива, их форму и степень кривизны границ раздела.

2. Пластическая деформация сопровождается развитием субмикроструктурных образований в зонах, примыкающих к участкам зеренных границ с высокой локальной кривизной, которые не проявляют себя при измерении балла зерна, но фиксируются на изменении параметра организации Q_C .

3. Характер изменения микроструктуры при отжиге отражается на временной зависимости параметра Q_C , на которой проявляются период активации и область рекристаллизационного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. Ч. 1: Деформация и разрушение. Ч. 2: Механические испытания. Конструкционная прочность / Я. Б. Фридман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – Ч. 1, 472 с. Ч. 2, 368 с.
2. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балохонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.] ; под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
3. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1978. – 646 с.
4. Кристиан Дж. Термодинамика и общая кинетическая теория. Теория превращения в металлах и сплавах / Дж. Кристиан ; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 810 с.
5. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, Л. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.

Афанасьева И. В., Анисимов В. В.
I. V. Afanasyeva, V. V. Anisimov

**ОЦЕНКА НЕКАНЦЕРОГЕННОГО РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ПЕРСОНАЛА
ООО «РН-КОМСОМОЛЬСКОГО НПЗ»**

**NON-CARCINOGENIC RISK WEIGHTING FOR WORKERS' HEALTH AT
THE KOMSOMOLSK-ON-AMUR OIL REFINERY PLANT**



Афанасьева Ирина Викторовна – аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-909-845-38-95. E-mail: bgd4@mail.ru.

Ms. Irina V. Afanasyeva – PhD candidate at the Department of Health&Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin avenue; 8-909-845-38-95. E-mail: bgd4@mail.ru.



Анисимов Виктор Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-909-860-17-36. E-mail: viktor_anisimov@mail.ru.

Mr. Viktor V. Anisimov – PhD in Engineering, Assistant Professor at Department of Health&Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin avenue; 8-909-860-17-36. E-mail: viktor_anisimov@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрена процедура оценки неканцерогенного риска для здоровья работников Комсомольского нефтеперерабатывающего завода: представлено три варианта сценария поступления неканцерогенных веществ в организм работников; рассчитаны значения коэффициентов опасности; на основе расчетных данных выделены профессиональные группы; разработаны частные модели «доза – эффект».

Summary. The paper considers the procedure of non-carcinogenic risk weighting for workers' health at the Komsomolsk-on-Amur Oil Refinery Plant: three versions of the scenario for non-carcinogenic substance penetration into the workers' organisms are proposed; danger coefficient values are estimated; professional groups are identified on the basis of rated data; particular models of the «dose – effect» type are created.

Ключевые слова: оценка риска, неканцерогенное вещество, среда, коэффициент опасности, неканцерогенный риск, персонал, профессиональная группа, заболеваемость, частная модель.

Key-words: risk weighting, non-carcinogenic substance, environment, danger coefficient, non-carcinogenic risk, personnel, professional group, morbidity, particular models.

УДК 613.630

Введение

Здоровье человека находится в прямой зависимости от состояния окружающей его среды, изменения среды обитания влекут за собой рост экологически обусловленного изменения здоровья населения. В исследованиях, проведенных во многих регионах России, были установлены прямые и средние по силе связи между среднегодовыми концентрациями веществ в атмосферном воздухе и заболеваемостью (смертностью) населения. Значения некан-

церогенных рисков в несколько раз превышены в основном для взвешенных веществ, диоксида азота.

Первичная заболеваемость населения г. Комсомольска-на-Амуре по всем классам болезней превышает средние показатели по стране на 20 – 30 % и имеет тенденцию к повышению (см. рис. 1 – 3). Лидирующую позицию среди нозологических форм в городе занимают болезни органов дыхания (29 %), что может объясняться как воздействием климатического фактора, так и химического [4].

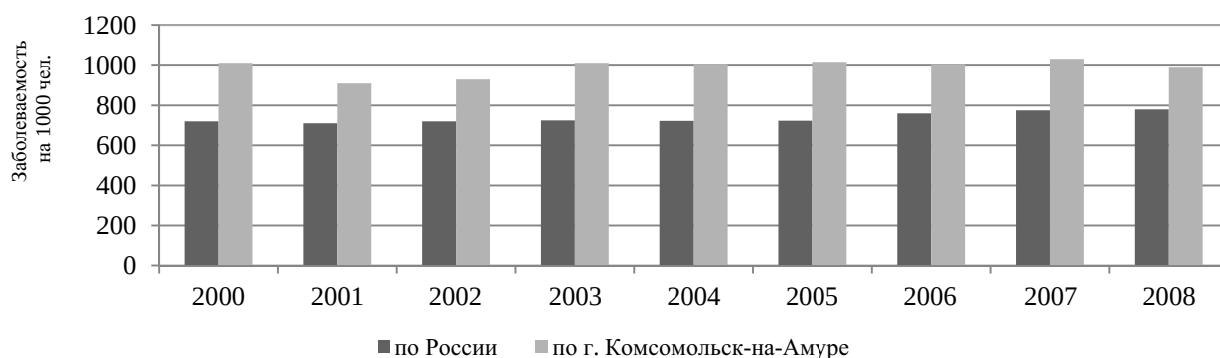


Рис. 1. Динамика первичной заболеваемости населения по всем классам болезней в г. Комсомольске-на-Амуре и РФ

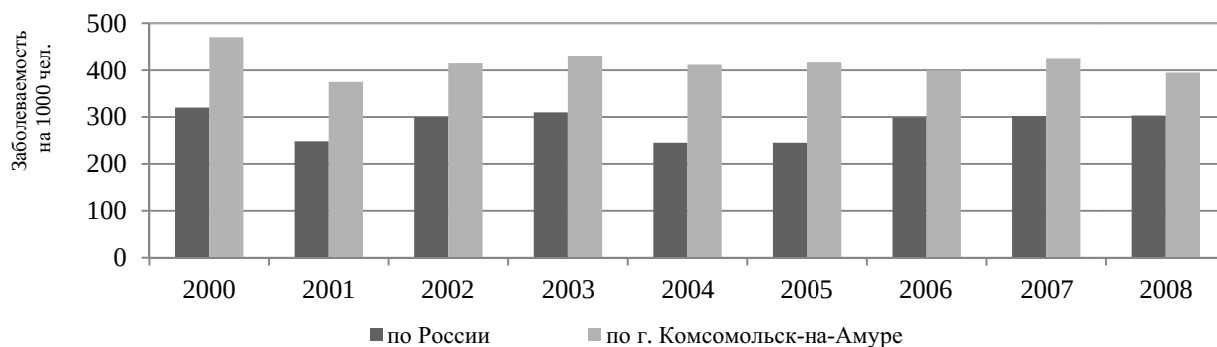


Рис. 2. Динамика первичной заболеваемости населения болезнями органов дыхания в г. Комсомольске-на-Амуре и РФ

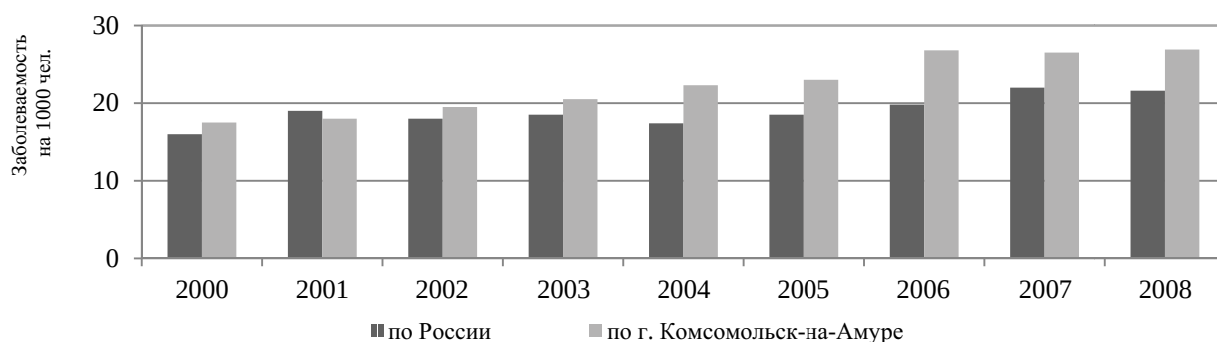


Рис. 3. Динамика первичной заболеваемости населения болезнями системы кровообращения в г. Комсомольске-на-Амуре и РФ

В общей структуре валовых выбросов объекта исследования, ООО «РН – Комсомольского НПЗ», по данным на 2011 г., в атмосферу выбрасывается более 4715 т загрязняющих веществ, из них на канцерогены приходится лишь 0,7 % (≈ 32 т), на неканцерогены – 99,3 % (≈ 4683 т) [5]. То есть выбросы завода составляют в основном неканцерогены, 48 наименований.

Так как атмосферный воздух всех трех сред, рассматриваемых в данном исследовании, загрязнен комплексом вредных веществ, то каждый сотрудник ООО «РН – Комсомольского НПЗ» будет подвергаться комбинированному воздействию всех химических факторов. Последние изменения в российском законодательстве обязывают разрабатывать и внедрять новые технологии для оценки профессиональных рисков, что делает наше исследование актуальным.

Ранее нами было проведено исследование канцерогенных ингаляционных рисков для персонала данного предприятия [1]. Целью же данной статьи является оценка ингаляционного неканцерогенного риска для персонала этого нефтеперерабатывающего завода для совершенствования системы менеджмента профессионального здоровья и безопасности на ООО «РН-Комсомольском НПЗ». Оценка риска также будет проведена с учетом пребывания работников в трех средах: производственно-технологической, производственной и городской [1].

Основные задачи исследования:

- 1) расчет неканцерогенных рисков по профессиональным группам;
- 2) выявление групп риска персонала нефтеперерабатывающего завода;
- 3) разработка частных моделей «доза – эффект».

Выявление веществ-неканцерогенов

По данным городских постов наблюдений [2], аттестации рабочих мест по условиям труда [3] и проекта предельно-допустимых выбросов КНПЗ [5], из всех веществ, присутствующих в воздушной среде рассматриваемых площадок, было отобрано 35 неканцерогенов. На органы дыхания оказывают воздействие 30 веществ, ЦНС – 12, по пять веществ на печень и почки, на кровь оказывают воздействие четыре вещества, на глаза – три, на сердечно-сосудистую, костную, нервную системы и развитие – по два вещества, на иммунную систему и массу тела – по одному веществу.

На уровне качественного анализа можно сделать предположение, что в результате воздействия выявленных химических веществ органы и системы организма будут подвергаться воздействию в очередности, обозначенной на рис. 4.

Критические органы / системы

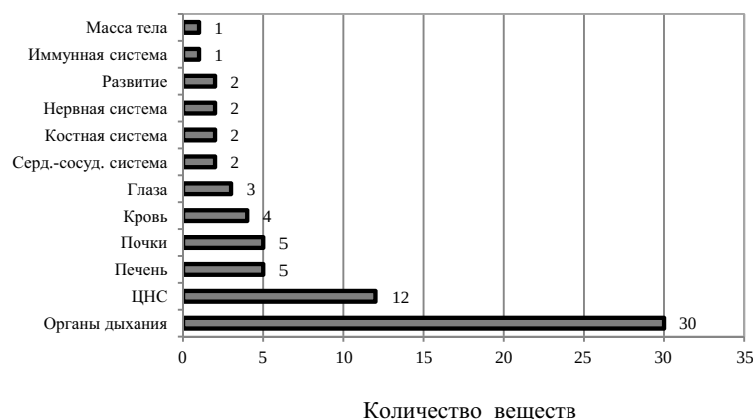


Рис. 4. Количество веществ, действующих на критические органы/системы

Для некоторых веществ доказано действие сразу на несколько органов. В этом случае имеет место учет их первостепенного воздействия для выявления наиболее вероятно поражаемых систем организма. Соотношение веществ по такому первостепенному воздействию показано на рис. 5.

Критические органы / системы

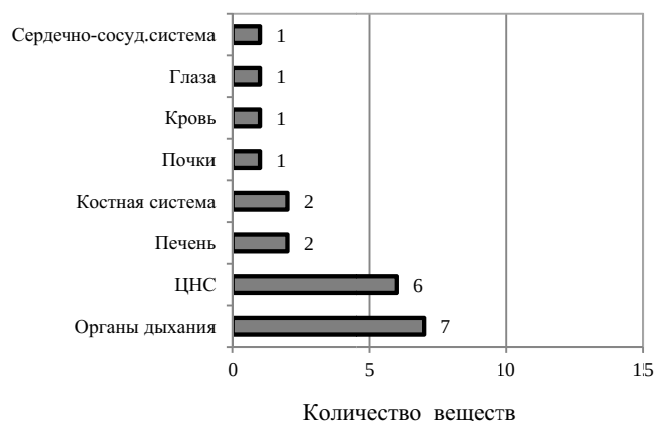


Рис. 5. Количество веществ по первоочередному действию на критические органы/системы

Таким образом, первоочередному воздействию подвергаются органы дыхания (семь веществ), ЦНС (шесть веществ), печень и костная система (по два вещества), почки, кровь, глаза и сердечно-сосудистая система (по одному веществу).

Сопоставляя данные двух диаграмм (см. рис. 4 – 5), можно отметить три группы веществ, места которых не изменились, – это вещества, оказывающие воздействие на органы дыхания, ЦНС и печень.

Сценарии воздействия

Расчеты неканцерогенного риска были проведены по трем сценариям. Сценарий № 1 предполагал рассмотрение только производственно-технологической среды, в его основе были заложены данные о концентрациях веществ в рабочей зоне [3]. В сценарии № 2 также рассматривается среда завода, но теперь она условно поделена на два временных промежутка: время нахождения в производственно-технологической среде и время нахождения в других условиях. Под «другими условиями» следует понимать нахождение в кабинетах, на открытом воздухе и т.д. – в производственной среде, где в ходе аттестации рабочих мест замеры не проводились, поэтому сведения о концентрациях веществ в этих зонах были выбраны по результатам рассеивания проекта предельно-допустимых выбросов предприятия [5].

Сценарий № 3 является, в свою очередь, уточнением ранее рассмотренного сценария № 2, а также учитывает концентрации загрязняющих веществ в городской среде [2]. Мы допускаем, что городская среда для каждого работника приблизительно одна и та же. Это связано, прежде всего, с недостатком данных и невозможностью зонирования территории города по уровню загрязнения.

Элементы выбранного маршрута воздействия:

1 – источник поступления веществ в окружающую среду: промышленность города и автотранспорт (в том числе объект исследования);

2 – воспринимающая, транспортирующая и воздействующая среды: атмосферный воздух;

3 – рецепторная точка (точка воздействия): рабочее место, городская среда;

4 – путь поступления при контакте человека с химическим веществом: ингаляционный (при вдыхании загрязненного воздуха).

В качестве главного пути воздействия принят именно ингаляционный. Предполагается, что вероятность контакта человека с вредными веществами максимальна при вдыхании загрязненного воздуха, и именно этот путь приводит к накоплению веществ в организме.

Методика проведения исследования

В методологии оценки риска в качестве параметров для оценки неканцерогенного риска используются референтные уровни воздействия – референтные дозы и концентрации (исходя из предположения о наличии порога вредного действия, ниже которого вредные эффекты не развиваются). Принцип установления референтных уровней воздействия представлен на рис. 6 [6].

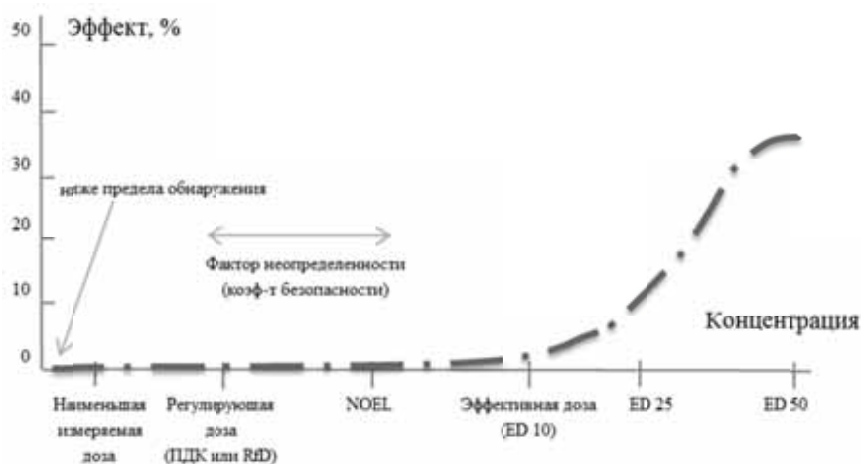


Рис. 6. Установление референтного уровня воздействия на основе пороговой или недействующей дозы

Согласно Р 2.1.10.1920-01, «референтная доза/концентрация» – это суточное воздействие химического вещества в течение всей жизни, которое устанавливается с учетом всех имеющихся современных научных данных и, вероятно, не приводит к возникновению неприемлемого риска для здоровья чувствительных групп населения [6].

В дальнейших расчетах для ингаляционного пути поступления веществ будет применяться именно референтная концентрация для хронического ингаляционного воздействия ввиду отсутствия референтных доз.

Стоит отметить, что превышение референтных концентраций не обязательно связано с развитием определенного вредного эффекта. Подразумевают, что чем выше воздействующая концентрация и чем больше она превосходит референтную, тем выше вероятность появления так называемых «вредных ответов».

Характеристика риска развития неканцерогенных эффектов для отдельных веществ проводится на основе расчета коэффициента опасности по формуле

$$HQ = AC / RfC,$$

где HQ – коэффициент опасности; AC – средняя концентрация, $мг/м^3$; RfC – референтная (безопасная) концентрация, $мг/м^3$.

При комплексном воздействии нескольких химических соединений оценка производится по величине индекса опасности HI по формуле

$$HI = \sum HQ_i,$$

где HQ_i – коэффициенты опасности для отдельных компонентов смеси воздействующих веществ.



При комплексной оценке многосредового и многомаршрутного поступлений химических веществ в организм человека используется суммарный индекс опасности ТНІ, который включает в себя показатели по всем критическим органам и системам и рассчитывается по формуле

$$ТНІ = \sum НІ_j,$$

где $НІ_j$ – индексы опасности для отдельных маршрутов воздействия.

Результаты исследования

По результатам расчетов ингаляционного неканцерогенного риска для всех 517 рабочих мест были сформированы 26 профессиональных групп в зависимости от принадлежности к определенному цеху, подразделению или установке цеха. Перечень групп и значения средних коэффициентов неканцерогенной опасности представлены в табл. 1.

Код каждой группы содержит цифру, определяющую принадлежность к определенному цеху. Буквенной аббревиатурой обозначены внутрицеховые подразделения или технологические установки.

Таблица 1

Результаты расчета $ТНІ_{ср}$ по профессиональным группам

Код группы		Описание группы	$ТНІ_{ср}$
1	G(XA-5)	Персонал химического анализа цеха № 5	2454,79
2	G(6)	Персонал цеха № 6	1617,40
3	G(Y-5)	Управление цеха № 5	1070,98
4	G(9)	Персонал цеха № 9	846,07
5	G(46)	Персонал цеха № 46	587,58
6	G(3)	Персонал цеха № 3	541,72
7	G(ЛЭБ-5)	Персонал лаборатории экологической безопасности цеха № 5	485,27
8	G(АВТ-3-1)	Персонал установки ЭЛОУ-АВТ-3 цеха № 1	467,39
9	G(УТЦ-14)	Персонал учебно-тренировочного центра цеха № 14	453,35
10	G(P-1)	Персонал ремонтной группы цеха № 1	446,46
11	G(11)	Персонал цеха № 11	434,61
12	G(8)	Персонал цеха № 8	433,18
13	G(15)	Персонал цеха № 15	387,90
14	G(2)	Персонал цеха № 2	387,37
15	G(И-1)	Персонал установки изомеризации цеха № 1	355,64
16	G(4)	Персонал цеха № 4	332,41
17	G(ГСО-14)	Персонал газоспасательного отряда цеха № 14	310,78
18	G(7)	Персонал цеха № 7	309,43
19	G(УКР-1)	Персонал УКР цеха № 1	283,93
20	G(АВТ-2-1)	Персонал установки ЭЛОУ-АВТ-2 цеха № 1	260,80
21	G(33)	Персонал цеха № 33	212,82
22	G(12)	Персонал цеха № 12	169,54
23	G(Y-1)	Управление цеха № 1	165,01
24	G(ЗП-14)	Персонал здравпункта цеха № 14	71,13
25	G(22)	Персонал цеха № 22	62,24
26	G(A)	Персонал азотно-воздушной станции	43,67

В ходе исследования были получены суммарные неканцерогенные риски (общие индексы опасности), сформированные в трех средах, что позволило ранжировать рабочие места и профессиональные группы по уровню опасности.

Завышенные значения индексов опасности при норме $HI = 1$ можно объяснить следующим:

- использованием нового критерия – референтной концентрации RfC (который предназначен для окружающей, а не производственной среды);
- использованием средних среди максимальных значений концентраций ввиду отсутствия среднесменных и среднесуточных.

Тем не менее весь персонал предприятия подвержен достаточно большому уровню неканцерогенного риска, наибольший вклад в значение индекса опасности вносит именно производственная среда (98,6 %).

Частные модели «доза – эффект»

По данным, полученным в здравпункте предприятия, были отобраны четыре нозологические формы заболеваний: болезни органов дыхания, болезни почек и мочеполовой системы, болезни глаза и его придатков, болезни сердечно-сосудистой системы. Сделано предположение, что эти заболевания обусловлены присутствием в воздухе сред веществ направленного действия на соответствующие органы и системы. Проведен сравнительный анализ с индексами неканцерогенной опасности по профессиональным группам. В результате сопоставления данных заболеваемости и индексов неканцерогенной опасности было выбрано линейное приближение, дающее максимальную степень приближения.

Важно также отметить, что на состояние здоровья работников оказывают влияние и метеорологические условия. Наиболее подверженными данному физическому фактору являются профессиональные группы технологических цехов: $G(1; 2; 3)$. Эти группы вносят определенную погрешность при их рассмотрении с другими группами, поэтому целесообразно разделить группы персонала на технологические и нетехнологические.

Болезни органов дыхания: увеличение индекса опасности на 300 единиц приведет к одному дополнительному случаю заболевания болезни органов дыхания и порядка 13 дополнительным дням нетрудоспособности на 100 работающих. При тех же условиях, при увеличении индекса TNI на 300 единиц, для технологических групп это приведет к 3,6 дополнительным случаям заболевания и 31,2 дополнительным дням нетрудоспособности на 100 работающих (величина достоверности аппроксимации для технологических групп составляет порядка 0,03 – 0,033). Для нетехнологических групп такое же увеличение индекса TNI приведет к 1,2 дополнительным случаям и 17,4 дополнительным дням нетрудоспособности на 100 работающих (коэффициент достоверности: 0,112 – 0,235).

Болезни почек и мочеполовой системы: при рассмотрении всех профессиональных групп один дополнительный случай заболевания и 11,5 дней нетрудоспособности на 100 работающих будут происходить при увеличении индекса TNI на 500 единиц. Для технологических групп то же самое увеличение индекса приведет к возникновению 2,5 дополнительных случаев заболевания и 61 дополнительному дню нетрудоспособности на 100 работающих (коэффициент достоверности: 0,116 – 0,137). Для нетехнологических групп зависимость не была подтверждена.

Болезни глаза и его придатков: при рассмотрении всех профессиональных групп и по отдельности зависимость не была выявлена. Для нетехнологических групп один дополнительный случай заболевания возможен при увеличении индекса TNI на 1000 единиц, что приведет также к девяти дополнительным дням нетрудоспособности на 100 работающих (коэффициент достоверности: 0,052 – 0,005).

Болезни сердечно-сосудистой системы: для всех профессиональных групп один дополнительный случай заболевания и 32 дополнительных дня нетрудоспособности на 100 работающих будут наблюдаться при увеличении индекса опасности на 0,1. При тех же задан-



ных условиях для технологических групп это даст 0,2 дополнительных случая и шесть дополнительных дней нетрудоспособности (коэффициент достоверности достаточно низкий: 0,004 – 0,002). Для нетехнологических групп – это 1,3 дополнительных случая и уже 45 дней нетрудоспособности на 100 работающих (коэффициент достоверности самый высокий из всех полученных ранее: 0,154 – 0,44).

Таким образом, получены частные модели зависимости «доза – эффект» по двум нозологическим формам: болезни органов дыхания и болезни сердечно-сосудистой системы. Частично подтверждена зависимость для болезней почек и мочеполовых систем и болезней глаза и его придатков, что свидетельствует о влиянии не только химических веществ на формирование заболеваемости по данным формам и необходимости дальнейших исследований по выявлению приоритетных факторов воздействия.

Обсуждение результатов

На всех этапах оценки риска, как правило, присутствуют неопределенности. Наибольшее же влияние на достоверность итоговых оценок риска, по нашему мнению, оказывают неопределенности, связанные с оценкой экспозиции. В качестве таких факторов можно выделить:

- рассмотрение только одного пути поступления (ингаляционного) и исключение из анализа других вследствие отсутствия данных;
- ограниченные сведения о результатах мониторинга, которые не отражают текущее состояние городской среды;
- ограниченные сведения о веществах, присутствующих в рабочей зоне, которые не были учтены и замерены при аттестации рабочих мест по условиям труда;
- использование обобщенных данных проектов аттестации рабочих мест и результатов рассеивания веществ на территории предприятия;
- предположения о частоте и продолжительности различных видов деятельности персонала;
- выбранные значения времени осреднения экспозиции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева, И. В. Оценка канцерогенного риска для профессиональных групп ООО «РН-Комсомольского НПЗ» / И. В. Афанасьева, В. В. Анисимов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 102-107.
2. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Хабаровского края в 2010 году / под ред. В. М. Шихалева. – Хабаровск: Министерство природных ресурсов Хабаровского края, 2011. – 267 с.
3. Материалы аттестации рабочих мест по условиям труда в ООО «РН – Комсомольский НПЗ». – 2009. – 46 т.
4. Отчет «Оценка риска для здоровья населения от воздействия выбросов объектов ООО «РН – Комсомольского НПЗ» и арендных предприятий (г. Комсомольск-на-Амуре Хабаровского края РФ)». – Казань, 2010. – 365 с.
5. Проект предельно-допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух ООО «РН – Комсомольского НПЗ», 2009. – 2 т.
6. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду [Электронный ресурс]: доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».

Вахрушева В.О., Вахрушева Е.А., Гринкруг Н.В.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОАО «КОМСОМОЛЬСКИЙ ХЛАДОКОМБИНАТ»
НА ГОРОДСКУЮ СРЕДУ

Вахрушева В. О., Вахрушева Е. А., Гринкруг Н. В.
V. O. Vakhrusheva, E. A. Vakhrusheva, N. V. Grinkrug

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ОАО «КОМСОМОЛЬСКИЙ ХЛАДОКОМБИНАТ» НА ГОРОДСКУЮ СРЕДУ**

**ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT
OF KOMSOMOLSK-ON-AMUR COLD STORAGE FACILITY**



Вахрушева Вероника Олеговна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, ассистент преподавателя кафедры «Экономика и финансы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-914-163-5581. E-mail: vaxnika_89@mail.ru.

Ms. Veronica O. Vakhrusheva – PhD Candidate, assistant lecturer at the Department of Economics and Finance, Komsomolsk-on-Amur State Technical University Russia, (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Pr.; 8-914-163-5581. E-mail: vaxnika_89@mail.ru.



Вахрушева Елена Анатольевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика и финансы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-914-184-3871. E-mail: elena_vah@list.ru.

Ms. Elena A. Vakhrusheva – Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Economics and Finance, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Pr.; (8)914-184-3871. E-mail: elena_vah@list.ru.



Гринкруг Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление недвижимостью и кадастры» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; (8)914-184-0613. E-mail: fks@knastu.ru.

Ms. Natalya V. Grinkrug – Ph.D., Associate Professor of the Department of Construction and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Pr.; (8)914-184-0613. E-mail: fks@knastu.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются общие положения по устройству и безопасной эксплуатации аммиачных холодильных установок, требования к эксплуатации аммиачных холодильных установок ОАО «Комсомольский Хладокомбинат», требования к размещению холодильного оборудования, к системам контроля уровня загазованности и оповещения об аварийных утечках аммиака, токсические свойства аммиака. Оценена степень влияния деятельности и эксплуатации ОАО «Комсомольского Хладокомбината» на городскую среду и здоровье человека в целом.

Summary. This paper discusses general provisions for the design and safe operation of ammonia refrigeration systems, and more specifically requirements for: a) operation of ammonia refrigeration systems at Komsomolsk-on-Amur Cold Storage Facility, b) location and arrangement of refrigeration equipment, c) gas contamination monitoring systems d) ammonia emergency leaks' alert systems. The impact of the facility operation on the urban environment and human health in general is assessed.

Ключевые слова: экологическая экспертиза, аммиачные холодильные установки, оценка влияния деятельности, городская среда.

Key words: environmental assessment, ammonia refrigeration systems, impact audit; urban environment.



УДК 501.330

Экологическая экспертиза проведена на основе постановления Госгортехнадзора России от 30 июня 1998 г. № 38 «Правила устройства и безопасной эксплуатации аммиачных холодильных установок» [1].

Настоящие правила устройства и безопасной эксплуатации аммиачных холодильных установок разработаны в развитие приказа Госгортехнадзора России от 26 июня 1995 г. № 111 о взятии аммиачных холодильных систем под государственный надзор и распространение требований общих правил взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств на аммиачные холодильные установки.

На предприятии ОАО «Комсомольский Хладокомбинат» используются аммиачные холодильные установки, приняты три температурных режима: -10 °С, -30 °С, -40 °С.

Общие положения по устройству и безопасной эксплуатации аммиачных холодильных установок

Настоящие правила устройства и безопасной эксплуатации аммиачных холодильных установок действуют в дополнение к требованиям действующих общих правил взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств с учетом особенностей устройства и эксплуатации этих холодильных установок, распространяются на стационарные компрессорные холодильные установки (системы холодоснабжения), работающие по замкнутому циклу с использованием аммиака в качестве холодильного агента.

Требования настоящих правил распространяются на вновь проектируемые, строящиеся, реконструируемые и действующие холодильные установки всех предприятий и организаций независимо от их ведомственной принадлежности, организационно-правовых форм и форм собственности. Наряду с настоящими правилами при проектировании, монтаже, эксплуатации и ремонте холодильных установок, разработке и изготовлении холодильного оборудования следует руководствоваться также соответствующими требованиями действующих правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, правил устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов.

К эксплуатации может быть допущена аммиачная холодильная установка, предприятие-владелец которой имеет лицензию на право эксплуатации, выданную территориальными органами Госгортехнадзора России. Установка должна быть укомплектована обученным и аттестованным обслуживающим персоналом и иметь документацию.

Эксплуатация аммиачной холодильной установки должна осуществляться в соответствии с технологическим регламентом. Технологический регламент может быть разработан проектной организацией-разработчиком проекта, научно-исследовательской организацией или предприятием-владельцем холодильной установки по согласованию с проектной организацией-разработчиком проекта.

Руководители и владельцы холодильных установок обязаны обеспечить:

- обучение специалистов и производственного персонала в соответствии с нормативными документами Госгортехнадзора России;
- содержание холодильной установки в исправном состоянии и ее периодическое обследование в соответствии с требованиями настоящих правил и имеющейся документации;
- выполнение специалистами требований правил, а обслуживающим персоналом холодильной установки – соответствующих инструкций;
- постоянный контроль за соблюдением работниками всех требований инструкций по безопасности работ при эксплуатации, ремонте холодильной установки.

Запрещается присутствие необученных и неинструктированных лиц на территории аммиачной холодильной установки.

Общие требования к эксплуатации аммиачных холодильных установок

ОАО «Комсомольский Хладокомбинат»

Относительный энергетический потенциал Q_B технологических блоков, входящих в аммиачную холодильную установку, следует рассчитывать в соответствии с общими принципами, изложенными в действующих ОПВБ.

Общую массу горючих паров (газов) взрывоопасного парогазового облака, приведенную к единой удельной энергии сгорания, равной 46 000 кДж/кг, т.е. массу горючих паров (газов), можно рассчитать по формуле

$$m = \frac{E}{4,6 \times 10^4}.$$

Относительный энергетический потенциал взрывоопасности Q_B технологического блока находится расчетным методом по формуле

$$Q_B = \frac{1}{16,534} \times \sqrt[3]{E}.$$

По значениям относительных энергетических потенциалов Q_B и приведенной массе парогазовой среды осуществляется категорирование технологических блоков. При этом необходимо, как правило, принимать проектные решения, обеспечивающие $Q_B < 27$ (III категория взрывоопасности). Данные требования обеспечены $Q_B = 26$, т.е. III категория взрывоопасности.

Холодильные станции, поставляемые в виде контейнеров полной заводской готовности, а также холодильные машины блочной поставки, должны разрабатываться и изготавливаться соответствующими предприятиями по техническим условиям, согласованным с Госгортехнадзором России в установленном порядке.

Подключение технологических потребителей к этим станциям и машинам, а также их размещение на площадке, должно осуществляться в соответствии с действующими нормативными документами и настоящими правилами.

Требования к размещению холодильного оборудования

Оборудование, работающее на аммиаке, может размещаться в специальном помещении (машинном или аппаратном отделениях); в помещении потребителей холода; на открытой площадке.

Запрещается размещать холодильное оборудование под эстакадами технологических трубопроводов с горючими, едкими и взрывоопасными продуктами; над площадками открытых насосных и компрессорных установок, кроме случаев применения герметичных насосов или при принятии специальных мер безопасности, исключающих попадание аммиака на ниже установленное оборудование.

На предприятии ОАО «Комсомольский хладокомбинат» оборудование, работающее на аммиаке, расположено в аппаратном отделении, все требования к размещению соблюдены.

Помещения, в которых размещено аммиачное оборудование, должны соответствовать требованиям действующих норм пожарной безопасности (НПБ 105-95). Помещения, в которых при аварийной разгерметизации системы может быть достигнут нижний концентрационный предел взрываемости, должны иметь предохраняющие конструкции.

Помещения камер с непосредственным охлаждением могут быть отнесены к категории «Д» в соответствии с действующими нормами пожарной безопасности (НПБ 105-95), если при принятых технологических и объемно-планировочных проектных решениях концентрация аммиака в воздухе камеры не превысит нижнего предела взрывоопасности при аварийном раскрытии устройства охлаждения или трубопровода. При этом обвязку устройств охлаждения следует предусматривать так, чтобы они были разделены на отдельные технологические блоки с минимальным количеством аммиака, а на жидкостном аммиачном трубопроводе, подающем аммиак в блок, следует предусматривать быстродействующую автома-



тическую запорную арматуру, срабатывающую при достижении концентрации аммиака в воздухе камеры 60 мг/м^3 .

На ОАО «Комсомольский хладокомбинат» помещения, в которых размещено аммиачное оборудование, соответствуют требованиям действующих норм пожарной безопасности (НПБ 105-95). Все конструкции обмазаны специальным раствором, снижающим воспламеняемость помещения. Помещения, в которых при аварийной разгерметизации системы может быть достигнут нижний концентрационный предел взрываемости, имеют предохраняющие конструкции, т.е. при достижении предела блокируется помещение либо сбрасываются предохраняющие взрываемость конструкции.

Размещение машинных и аппаратных отделений в зданиях принимается в соответствии с требованиями действующих строительных норм и правил (СНиП). Запрещается размещение машинного (аппаратного) отделения в подвальных и цокольных этажах.

Расстояния между зданиями, в которых размещены машинные, аппаратные отделения, и другими сооружениями на площадке холодопотребляющего предприятия принимаются с учетом СНиП 11-89-80, а также СНиП 21.01.97 [3, 8].

Требования к инженерному оборудованию зданий и сооружений

Системы отопления и вентиляции машинного и аппаратного отделений должны выполняться в соответствии с требованиями СНиП 2.04.05-91 [4, 11]. Параметры воздуха в машинном и аппаратном отделениях должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.005-88 [2, 4].

Машинные, аппаратные отделения и распредустройства, располагаемые в помещениях, должны быть оборудованы системами приточно-вытяжной и аварийной вытяжной механической вентиляции. Кратность воздухообмена определяется проектной организацией. Удаляемый воздух может выбрасываться в атмосферу без очистки.

На оцениваемом предприятии все вышеперечисленные требования удовлетворяются.

Требования к системам контроля уровня загазованности и оповещения об аварийных утечках аммиака

Система контроля уровня загазованности и оповещения об аварийных утечках аммиака должна обеспечивать контроль за уровнем загазованности из-за возможных утечек аммиака в помещениях и на территории объекта. При использовании технологических блоков III категорий взрывоопасности:

- система контроля уровня загазованности обеспечивает в автоматическом режиме сбор и обработку информации о концентрации аммиака в воздухе у мест установки датчиков сигнализаторов концентрации паров аммиака в объеме, достаточном для формирования соответствующих управляющих воздействий;

- система контроля уровня загазованности при возникновении аварии, связанной с утечкой аммиака, в автоматическом режиме включает технические устройства, задействованные в системе локализации и ликвидации последствий аварии, средства оповещения об аварии и отключает оборудование холодильной установки, функционирование которого может привести к росту масштабов и последствий аварии;

- структура системы контроля уровня загазованности является двухконтурной и двухуровневой: наружный контур обеспечивает контроль за уровнем загазованности на территории аммиачной холодильной установки с выдачей данных для прогнозирования распространения зоны химического заражения за территорию объекта и контроль за аварийными утечками аммиака из оборудования холодильной установки, находящегося вне помещений, внутренний контур обеспечивает контроль за уровнем загазованности и аварийными утечками аммиака в помещениях.

Наружный и внутренний контуры системы контроля уровня загазованности имеют два уровня контроля концентрации аммиака в воздухе:

I уровень. Предельно допустимая концентрация (ПДК_{р.з}) – концентрация аммиака в воздухе рабочей зоны помещений и вне помещений, у мест установки датчиков достигла величины, равной 20 мг/м³ (ПДК_{р.з}).

II уровень. Аварийная утечка аммиака – концентрации аммиака у мест установки датчиков достигла величины, равной 25 ПДК_{р.з} или 500 мг/м³.

Система оснащена автоматическими средствами, позволяющими контролировать уровень загазованности на промышленной площадке (I уровень наружного контура контроля) и прогнозировать распространение зоны химического заражения за территорию объекта. Такое оснащение обосновано оценкой возможных последствий аварии, подтвержденной соответствующими расчетами.

На площадке установлено устройство, измеряющее направление и скорость ветра, данные которого используются при расчетах возможных масштабов загазованности.

Системы контроля, управления, сигнализация противоаварийной автоматической защиты холодильных установок

Системы контроля, автоматического и дистанционного управления, системы противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ), в том числе поставляемые комплектно с оборудованием, должны отвечать требованиям настоящих правил, действующей нормативно-технической документации, проектам, регламентам и обеспечивать заданную точность поддержания технологических параметров, надежность и безопасность эксплуатации холодильных систем.

Значения предельно допустимых параметров определяются разработчиком проекта по данным научно-исследовательских организаций, характеристикам средств контроля, измерения и управления, документации заводов-изготовителей оборудования. Световые сигналы об уровнях жидкого аммиака должны одновременно сопровождаться звуковым сигналом, включение которого должно быть ручным. Запрещается использование ртутных термометров (и ртутных устройств) для измерения температуры в контрольных точках аммиачной холодильной системы.

Для аммиачных систем разрешается применение специально предназначенных для эксплуатации в среде аммиака манометров и мановакууметров. Класс точности, размеры, установка приборов и сроки проверки должны соответствовать требованиям раздела 5.3 ПБ 10-115-96.

Исправность автоматических приборов защиты аммиачных компрессоров, а также сигнализаторов концентрации паров аммиака в воздухе помещений и наружных площадок, должна проверяться не реже одного раза в месяц, а исправность защитных реле уровня на аппаратах (сосудах) – один раз в 10 дней.

Все вышеперечисленные пункты системы контроля, управления, сигнализации противоаварийной автоматической защиты холодильных установок на предприятии ОАО «Комсомольский хладокомбинат» соблюдены и отвечают требованиям, предъявляемым к аммиачным холодильным установкам.

Для ликвидации последствий возможных аварий аммиачные холодильные установки оснащены системами и средствами подавления испарения и нейтрализации проливов жидкого аммиака, системами локализации и рассеивания газообразного аммиака. Холодильные установки укомплектованы передвижными отсасывающими устройствами.

Токсические свойства аммиака

Аммиак – бесцветный газ с характерным удушливым запахом. Используют как высококонцентрированное удобрение, при изготовлении синильной и азотной кислот, азотосодержащих солей, соды, медицинских препаратов, при крашении тканей, в холодильных установках. При действии на человека поражает дыхательные пути (см. табл. 1).



Токсичные свойства аммиака (для людей)

Объемное содержание аммиака в воздухе	Значение, % (мг/м ³)
Предельно допустимое в рабочей зоне (ПДК)	0,0028 (20)
Не вызывающее последствий после пребывания в течение 60 мин	0,035 (250)
Опасное для жизни	0,05 – 0,1 (350 – 700)
Вызывающее смертельный исход при воздействии в течение 30-60 мин	0,21 – 0,39 (1500 – 2700)
Порог восприятия обонянием	0,0007 – 0,005 (5 – 35)
Ощущение раздражения слизистых оболочек немедленное раздражение:	(100)
горла	(280)
глаз	(490)
кашель	(1200)
Не появляются последствия после пребывания в течение 1 ч (не более)	0,035 – (250)

Жидкий аммиак вызывает ожоги кожи, а его пар – эритемы кожи. Большую опасность представляет попадание аммиака в глаза. Аммиак относится к газам 4-го класса опасности (ГОСТ 12.1.005-88), смесь паров которого с воздухом при объемном их содержании от 15 до 28 % (107 – 200 мг/л) является взрывоопасной.

Оценка влияния деятельности предприятия на городскую среду

Любое промышленное предприятие при несоблюдении норм и правил эксплуатации оказывает отрицательное влияние на городскую среду и на здоровье человека.

При оценке влияния ОАО «Комсомольский Хладокомбинат» на городскую среду было выявлено, что все нормы и правила эксплуатации аммиачных установок не нарушены. Все установки проходят техническое обследование каждый год, в соответствии с регламентом выписывается заключение по каждой из установок.

Все выбросы в атмосферу не превышают предельно-допустимую концентрацию и абсолютно безвредны для окружающей среды и здоровья проживающих в данной зоне людей.

Проведены мероприятия, снижающие риск взрывоопасности на предприятии, т.к. предприятие относится ко II категории взрывоопасности.

Разработаны определённые средства локализации аварийных ситуаций. Для ликвидации последствий возможных аварий аммиачные холодильные установки оснащены системами и средствами подавления испарения и нейтрализации проливов жидкого аммиака, системами локализации и рассеивания газообразного аммиака.

Таким образом, можно сказать, что оцениваемое предприятие не наносит вред окружающей среде и может эксплуатироваться в дальнейшем по вышеперечисленным требованиям к эксплуатации предприятий данной промышленной категории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации аммиачных холодильных установок / А. А. Шатов [и др.]. – ПБ 09-220-98, 1998. – 92 с.
2. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
3. СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».
4. СНиП 11-89-80 «Генеральные планы промышленных предприятий».
5. СНиП 21.01.97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений».
6. http://www.ui.kg/inc/citdem/rus/hearing_handbook_rus.pdf

Турбина Е.С.

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕЙ

(НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БИРОБИДЖАНА)

Турбина Е. С.

E. S. Turbina

**ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РЕБЕНКА
(НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БИРОБИДЖАНА)**

**THE ENVIRONMENT AND CHILD'S HEALTH&SAFETY
IN THE CITY OF BIROBJAN**



Турбина Елена Сергеевна – старший преподаватель кафедры экологии и биологии Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, Биробиджан); 679000, г. Биробиджан, ул. Чапаева 5, кв. 91; 8(42622)2-07-82. E-mail: turbinae@list.ru; lorabel@bk.ru

Ms. Yelena S. Turbina – Senior Lecturer at the Department of Environmental and Biological Studies, Sholom Aleihem Priamursky State University (Russia, Birobidjan). Mail address: 679000, Birobidjan, 91 Chapayeva St., apt. 5, tel. (h): + (742622) 2-07-82. E-mail: turbinae@list.ru; lorabel@bk.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние загрязнения атмосферного воздуха на уровень безопасности жизнедеятельности детей-дошкольников. На основе данных анкетирования, исследования уровня загрязнения атмосферного воздуха с использованием метода индикации снежного покрова, анализа индивидуальных карт развития детей и корреляционного анализа показано, что загрязнение атмосферного воздуха в районе расположения дошкольных образовательных учреждений и местах постоянного проживания детей способствует повышению уровня заболеваемости.

Summary. The paper examines the impact of air contamination on the level of pre-school children's health and safety. A survey, an investigation of air contamination by snow cover indication, analysis of children's medical charts and correlation analysis have collectively shown that air contamination in the surveyed pre-school sites and areas of residence contributes to the children's morbidity.

Ключевые слова: безопасность жизнедеятельности, среда обитания, взвешенные вещества, загрязнение воздуха, антропогенная нагрузка, заболевания детей.

Key words: health and, environment, suspended solids, air contamination, man-induced impact, child morbidity.

УДК 614.8 +574

Окружающая среда, представляющая собой среду обитания и деятельности людей, по мере развития общественного производства все больше и больше зависит от результатов воздействия человека. Постоянно ухудшается экология. Это отрицательно сказывается на уровне безопасности жизнедеятельности людей и ведет к возрастанию процента заболеваний.

При этом дети страдают больше, чем взрослые, так как экологические загрязнители влияют на них сильнее. Они в целом едят больше пищи, пьют больше воды и вдыхают больше воздуха на единицу веса, чем взрослые, и, следовательно, более подвержены воздействию загрязнителей [5].

На здоровье детей оказывает влияние сложный комплекс факторов – это и климат, и медико-социальные условия, ведущими из которых являются состав семьи, жилье, уровень доходов, питание. Однако до 50 % в структуре заболеваемости детей составляет патология, обусловленная загрязнением окружающей среды [1; 2].

По сравнению с другими источниками поступления загрязняющих веществ в организм человека (пища, питьевая вода и др.) атмосферный воздух представляет особую опасность, поскольку на его пути нет заслона, подобного печени, оберегающего организм при



проникновении чужеродных для организма человека веществ через желудочно-кишечный тракт [4].

В последние годы в связи со значительным увеличением числа автомобилей и развитием городской инфраструктуры многие дошкольные образовательные учреждения (ДОУ) оказались расположенными в районах с неблагоприятной экологической обстановкой.

Дети проводят в ДОУ значительное количество времени (исключая отпуск родителей, выходные и праздничные дни в среднем 200-220 дней в году). Продолжительность дневного пребывания в среднем составляет 8-9 ч, в течение которых они активны и значительную часть времени проводят на улице.

В связи со сказанным выше можно предположить, что воздействие на ребенка отрицательных экологических факторов, связанных с загрязнением атмосферного воздуха в районах расположения дошкольных образовательных учреждений, в которых они пребывают в течение дня, будет оказывать негативное воздействие на их здоровье.

Для проверки этой гипотезы нами было проведено исследование на примере города Биробиджана, в котором изучалась зависимость здоровья детей, проживающих и посещающих детские сады в определенных районах города, от загрязнения окружающего воздуха в этих районах.

Изучение публикаций, посвященных экологии Биробиджана [3], а также проведенный нами анализ районов города на имеющиеся источники загрязнения позволил выделить для сопоставительного исследования четыре района с расположенными в них дошкольными учреждениями (1-й район – ДОУ 11; 2-й район – ДОУ 15, 28, 39; 3-й район – ДОУ 32; 4-й район – ДОУ 43 и 37).

В ходе исследования нами были использованы различные методы для решения следующих задач:

1. Путем анкетного опроса определялись социальные факторы, которые могут влиять на заболеваемость детей, и выявлялась субъективная оценка родителями уровня загрязнения окружающей среды в районе проживания вблизи обследуемых ДОУ.

2. Методом индикации снежного покрова определялся уровень загрязнения атмосферного воздуха взвешенными веществами (ВВ) на территориях детских садов.

3. Путем анализа данных, содержащихся в картах развития детей 3-6 лет, проживающих вблизи детских садов (изучено 1088 карт), определялся уровень заболеваемости детей.

4. С использованием методов корреляционного анализа устанавливалась зависимость заболеваемости детей от уровня загрязнения атмосферного воздуха в районах расположения детских садов.

Для выявления социальных факторов, которые могут влиять на здоровье детей, был проведен анкетный опрос родителей. Анкеты включали вопросы о социальном статусе семьи и экологической ситуации в районах проживания детей, примыкающих к ДОУ.

Оценка социального статуса исследуемых семей оценивалась по результатам ответов на вопросы, касающиеся условий проживания семьи, финансового положения, обеспеченности ребенка продуктами питания. Кроме того, учитывалось количество детей, воспитывающихся только одним родителем.

Сопоставление результатов опроса показало, что исследуемые группы по анализируемым социальным показателям являются относительно однородными, больших отклонений от средних значений не наблюдалось ни в одном из районов. Достоверных различий между районами, определяемых по критерию хи-квадрат, не было выявлено ($P > 0,05$). Этот результат дал основание заключить, что влияние социальных факторов на здоровье детей во всех районах города проявляется одинаково, и позволил исключить их из дальнейшего рассмотрения.

Ответы на вопросы анкеты, связанные с оценкой экологической обстановки в районе проживания, сравнивались с данными исследования загрязнения атмосферного воздуха в районе расположения ДОУ, полученными методом индикации снежного покрова.

Пробы снега на территориях обследованных ДОУ отбирались в конце зимнего сезона – в середине марта, что давало возможность оценить накопление ВВ за весь зимний период.

Содержание ВВ в снежном покрове на территориях детских садов показано на рис. 1.

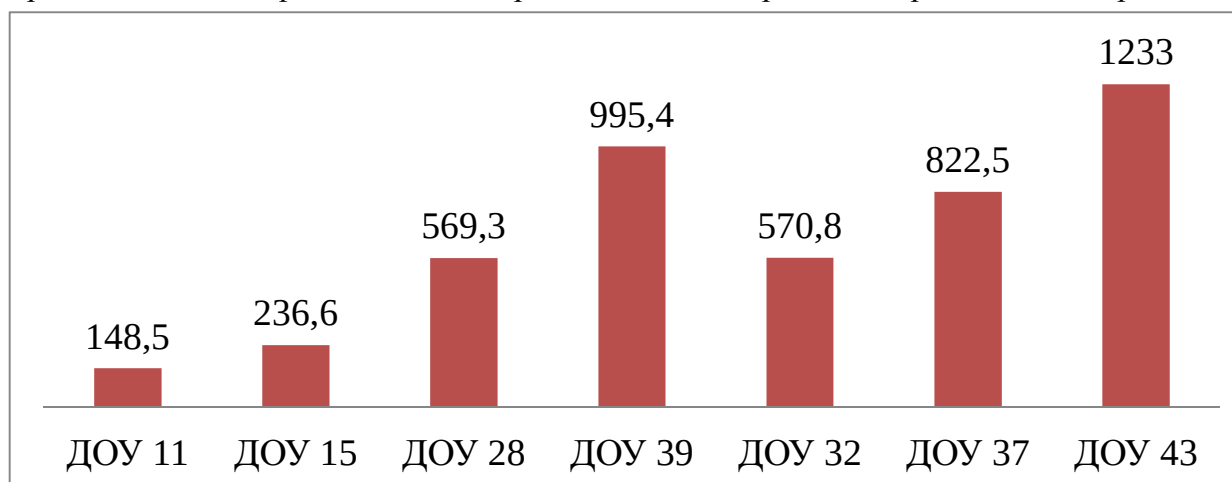
Наименьшее содержание ВВ определено на территории детского сада 11 из 1-го района. Наибольшие показатели отмечались на территориях детских садов 37 и 43 (4-й район), а

Турбина Е.С.

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕЙ

(НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА БИРОБИДЖАНА)

также ДОУ 39 (2-й район). Обращает на себя внимание высокая запыленность территории ДОУ 39, она в несколько раз выше, чем на территориях других детских садов этого же района (15 и 28). Скорее всего, это связано с месторасположением детского сада. С юго-западной стороны вдоль всего фасада здания на расстоянии 50 м проходит городская автодорога.



/ 1-й район / 2-й район / 3-й район / 4-й район /

Рис. 1. Содержание взвешенных веществ в снежном покрове на территориях детских садов (мг/дм³) за зимний период 2009-2010 гг.

Объективные данные, характеризующие содержание ВВ на территориях ДОУ, полученные методом индикации снежного покрова, в основном совпали с субъективными данными, полученными при ответе родителей на вопросы об экологической обстановке в районе проживания.

Некоторые отличия субъективной и объективной оценок проявились при характеристике экологической обстановки вблизи ДОУ 39 (2-й район) и ДОУ 32 (3-й район).

Это связано с тем, что дорога с интенсивным движением автотранспорта, проходящая в 50 м от ДОУ 39, находится в некотором отдалении от места постоянного проживания обследуемых семей. В 3-м районе пробы снега брались в непосредственной близости от ДОУ 32, который находится на некотором расстоянии от котельных (300-350 м), тогда как большинство деревянных двухэтажных домов, где проживает часть респондентов, расположены в непосредственной близости к ним.

Показатели заболеваемости детей болезнями органов дыхания (средние данные за три года), полученные путем анализа данных, содержащихся в 1088 индивидуальных картах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели заболеваемости детей 3-6 лет болезнями органов дыхания
(по картам развития)

Номер района и ДОУ Наименование показателя	1-й район	2-й район			3-й район	4-й район	
	Номер ДОУ						
	11	15	28	39	32	37	43
Среднее количество болезней системы органов дыхания на одного ребенка в год	2,0	2,1	2,16	2,7	2,4	2,76	2,8
Средняя продолжительность одного случая заболевания ор- ганов дыхания (дни)	7,5	9,6	10,7	11,5	9,6	14,8	14,4



Из этих данных следует, что по сравниваемым показателям (среднее количество болезней системы органов дыхания и средняя продолжительность одного случая заболевания) наименьшие значения отмечаются в ДОУ 11 (1-й район). Наибольшие отклонения от этого значения, принятого за фоновый уровень заболеваемости, зафиксированы в ДОУ 37 и 43 (4-й район) и ДОУ 39 (2-й район).

Там, где зафиксировано соответствие экологической обстановки в районе детского сада и по месту проживания детей, выявлено пропорциональное соответствие уровня загрязнения воздуха и уровня заболеваемости детей.

По тем ДОУ, где было отмечено некоторое отклонение объективной оценки загрязнения воздуха в районе детского сада, полученной методом индикации снежного покрова, от субъективной оценки экологической обстановки в районе проживания детей, полученной методом анкетного опроса, выявлено определенное отклонение от пропорционального соответствия уровня загрязнения воздуха и уровня заболеваемости.

Это можно объяснить тем, что дети находятся в детских садах лишь в течение рабочих дней. Все остальное время они преимущественно находятся по месту проживания.

Для выявления связи между загрязнением территорий детских садов взвешенными веществами и заболеваемостью детей, посещающих эти сады, нами были вычислены коэффициенты корреляции между содержанием ВВ в снежном покрове и показателями заболеваемости. Коэффициенты корреляции (К) высчитывались методом рангов (Спирмена), кроме того, в каждом случае был вычислен критерий t (см. табл. 2).

Таблица 2

Характеристика корреляционных связей между запыленностью территорий ДОУ и заболеваемостью детей

Показатель	К	t
Среднее количество болезней системы органов дыхания (на одного ребенка в год)	0,97	9,7
Средняя продолжительность одного случая заболевания органов дыхания (дни)	0,84	3,5

Значения коэффициентов корреляции, находящиеся в пределах от 0,7 до 1, говорят о сильной связи между признаками, $t \geq 3$, свидетельствуют о достоверных результатах исследования. Из данных табл. 3 следует, что между показателями заболеваемости и содержанием ВВ в снежном покрове прослеживается достоверная сильная прямая связь.

Это дает основание заключить, что нахождение детей в течение рабочих дней в ДОУ, расположенных в зоне воздействия отрицательных экологических факторов, приводит к снижению уровня безопасности их жизнедеятельности, способствуя повышению количества болезней и увеличению их продолжительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вельтищев, Ю. Е. Экология и здоровье детей. Химическая экотология / Ю. Е. Вельтищев, В. В. Фокеева. – М.: Московский НИИ педиатрии и детской хирургии, 1996. – 57 с.
2. Гичев, Ю. П. Загрязнение окружающей среды и экологическая обусловленность патологии человека / Ю. П. Гичев. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2003. – 138 с.
3. Калманова, В. Б. Влияние промышленно-транспортного комплекса на загрязнение снежного покрова г. Биробиджана / В. Б. Калманова, Р. М. Коган, Д. В. Зайков // I Международный экологический конгресс «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов». – Тольятти: Тольяттинский гос. ун-т, 2007. – Т. 1. – С. 251-256.
4. Христофорова, Н. К. Экологические проблемы региона: Дальний Восток – Приморье: учеб. пособие / Н. К. Христофорова. – Хабаровск: Хабаровское книжное изд-во, 2005. – 304 с.
5. America's Children and the Environment: *Measures of Contaminants, Body Burdens, and Illnesses*. Second Edition. 2003. Environmental Protection Agency, United States. <http://www.epa.gov/envirohealth/children/contaminants/index.htm>.

Сысоев О. Е.
O. E. Sysoev

**УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ МОНИТОРИНГА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ
И МЕХАНИЗМОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, МАШИНОСТРОЕНИИ И АВИАЦИИ**

**UNIVERSAL MONITORING CRITERIA FOR LIMIT TOLERANCE STATES OF CON-
STRUCTION MATERIALS DURING OPERATION/RUNNING OF STRUCTURES AND
EQUIPMENT IN CIVIL ENGINEERING, MECHANICAL ENGINEERING AND AVIA-
TION**

Сысоев Олег Евгеньевич – кандидат технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +7 (4217) 241-141. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg E. Sysoev – PhD in Engineering, Professor, Dean of the Faculty of Cadastre and Civil Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, Komsomolsk-on-Amur 681013, 27 Lenina Pr., tel.: + (74217) 241-141. E-mail: fks@knastu.ru

Аннотация. Исследована возможность мониторинга предельных состояний конструкционных материалов в режиме реального времени, а также предложены критерии безопасной эксплуатации конструкций, деталей машин и механизмов.

Summary. The paper considers the real-time process of monitoring of limit tolerance states of construction materials; criteria for safe operation of structures and details/parts of machinery are proposed.

Ключевые слова: малоцикловые нагрузки, сложнапряженное состояние, критерии предельных состояний материалов, акустическая эмиссия.

Key words: low-cycle loading, combined stress, criteria for limit tolerance states, acoustic emission.

УДК 53.082

При проектировании машин, зданий и сооружений закладываются значительные запасы прочности, но, несмотря на это, время от времени происходят аварии. Анализ причин катастроф показывает, что они являются результатом неправильной эксплуатации конструкций, ошибочных решений при сборке конструкций (замена материалов, несоблюдение технологических процессов), а в некоторых случаях ошибок при проектировании. Запасы прочности, закладываемые при проектировании, подчас избыточные, но не учитывают процессов изменения структуры конструкционных материалов на разных уровнях ее эволюции и вызывают неоправданные экономические затраты. Более того подавляющее большинство современных конструкций и машин работают под воздействием малоцикловых нагрузений в условиях сложного напряженного состояния, когда в процессе эксплуатации происходит активное изменения структуры конструкционных материалов [1; 2]. Неконтролируемые изменения микроструктуры конструкционных материалов от воздействия циклических нагрузок приводят к внезапным разрушениям конструкций и механизмов.

Все это показывает необходимость создания универсальных систем мониторинга состояния конструкционных материалов при эксплуатации деталей машин и сооружений в реальном времени, что позволит своевременно определять их предельное состояние, предотвращая возможные аварии. Основой для таких систем может стать метод акустической эмиссии, так как методы тензометрии и фотограмметрии имеют существенные ограничения по

температурным режимам и компактности соответственно и не отслеживают изменение структуры материала.

Акустическая эмиссия возникает по мере приложения к материалу внешних воздействий. При этом происходит динамическое диссипативное перестроение структуры материала, рождающее волны упругих колебаний. Любое изменение структуры отражается изменением параметров сигналов АЭ (количество и энергия импульсов, их частота и др.). Особенно важно, что при воздействии циклических нагрузок, в отличие от статических, диссипативные структуры образуются непрерывно и динамично [1; 2; 3].

Таким образом, любое изменение структуры материала, появление и залечивание дефектов сопровождаются излучением АЭ [3; 4]. По количеству и энергии сигналов АЭ можно определить изменения дефектности структуры конструкционных материалов. Количество дефектов в структуре материала и скорость их накопления от воздействия циклических нагрузений определяют скорость деградации структуры конструкционного материала и позволяют спрогнозировать момент разрушения.

Для определения предельных состояний в конструкционных материалах от воздействия циклических нагрузок по параметрам АЭ на базе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета были проведены испытания трубчатых образцов с рабочей частью образца $l = 10$ мм, $D = 10$ мм и толщиной стенки $h = 0.5$ мм из материалов, используемых в машиностроении, строительстве и авиастроении: сталь 40Х, алюминиевый сплав Д20 и титановый сплав ВТ20. Трубчатые образцы были использованы для получения однородного плосконапряжённого состояния, это дало возможность выявить влияние вида напряженно-деформированного состояния на длительную прочность конструкционных материалов и параметры АС.

Испытания проводились на испытательной машине, созданной на основе МИ-40КУ [5] с использованием оригинального программного обеспечения [6]. Что позволило задавать программу малоцикловых испытаний по пилообразному циклу с асимметрией $R = 0,5$. Для использования максимальных прочностных возможностей материала нагружение было принято мягким с интенсивностью напряжения $\sigma_i \approx 0,95\sigma_{\text{пр}}$, $\sigma_i = 400$ Мпа (для сплава Д20), $\sigma_i = 800$ Мпа (сплава ВТ20) и $\sigma_i = 800$ Мпа (для стали 40Х).

Одновременно с непрерывной записью накопления величины циклической деформации производилась запись сигналов акустической эмиссии с применением оригинального программного обеспечения [7].

Разработанная комплексная программа исследований долговечности материалов (см. рис. 1) предусматривала проведение экспериментов при программном нагружении по различным траекториям механического малоциклового нагружения в условиях плоского напряженного состояния с одновременной регистрацией параметров акустической эмиссии. Процесс нагружения в точке упругопластически деформируемого тела происходил в плоскости двумерного вектора напряжений (см. рис. 1). Уравнение такой траектории нагружения имеет вид:

$$\vec{S} = S_1 \cdot \vec{i}_1 + S_3 \cdot \vec{i}_3 = S(t), \quad (1)$$

где S_1, S_3 – компоненты вектора напряжений.

Такое напряженное состояние, характеризуемое компонентами тензора напряжений $\sigma_{zz}(t) \neq 0$ и $\tau_{z\theta}(t) \neq 0$, создавалось в тонкостенном цилиндрическом образце, который подвергался растяжению и кручению ($N = N(t)$; $M_{\text{кр}} = M_{\text{кр}}(t)$).

Данная программа исследования позволяла создавать в материале плосконапряженное состояние при пропорциональном (по траектории $0 \rightarrow D \leftrightarrow A$, $0 \rightarrow F \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow G \leftrightarrow C$, см. рис. 1) и сложном (по траектории $0 \rightarrow G \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow D \leftrightarrow B$, см. рис. 1) циклическом нагружении ($\Delta\sigma_i = \sigma_{i\text{min}} \leftrightarrow \sigma_{i\text{max}}$). При этом вектор напряжений $S(t)$ в каждую единицу времени совпадает с вектором $\vec{\sigma}_i(t)$:

$$\vec{\sigma}_i(t) = \sqrt{3}\tau_{z\theta}(t) \cdot \vec{i}_3 + \sigma_{zz}(t) \cdot \vec{i}_1 = S(t), \quad (2)$$

конец которого описывает соответствующую траекторию нагружения в пространстве напряжений. В работах [8; 9] показано, что интенсивность накопления пластических деформаций, а также долговечность материалов при прочих равных условиях зависит от пути циклического нагружения.

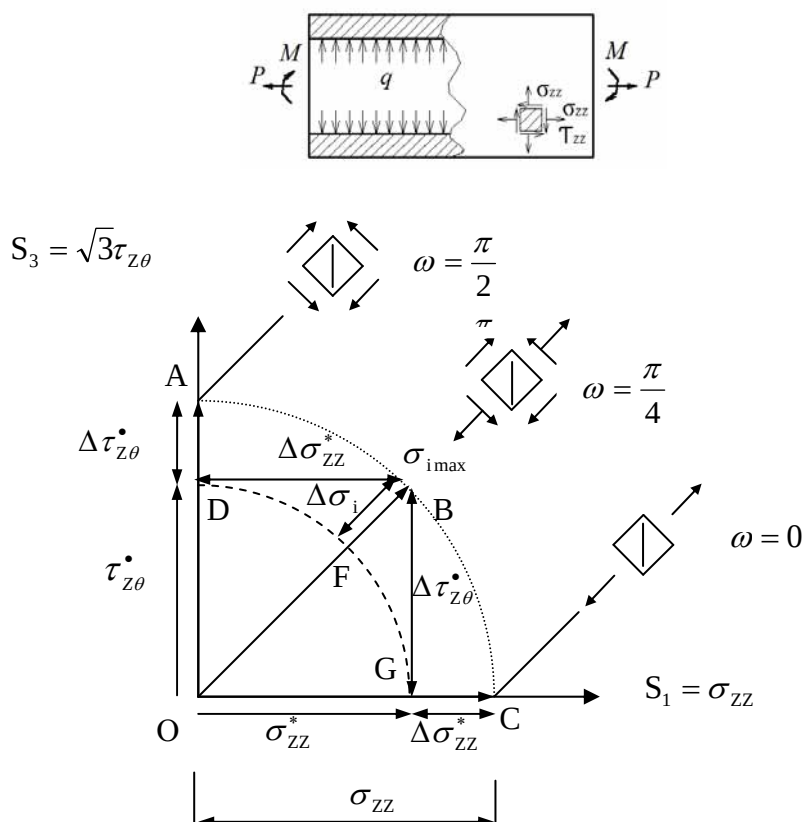


Рис. 1. Траектории циклического нагружения

Для изучения механизма разрушения материалов была разработана методика, позволяющая использовать метод акустической эмиссии при исследовании кинетики накопления повреждений образцов, подвергаемых циклическому нагружению.

По результатам проведенных экспериментов были получены диаграммы накопления интенсивности деформаций для сплава Д20 (см. рис. 2), сплава ВТ20 (см. рис. 4) и стали 40Х (см. рис. 3).

Также были получены диаграммы энергии акустических сигналов по циклам нагружения сплава Д20 (см. рис. 5 – 9). Аналогичные диаграммы при соответствующей длительной прочности были получены для сплава ВТ20 и стали 40Х при различных видах пропорционального и сложного нагружения [8].

На рис. 5 – 9 по оси ординат отложена энергия сигнала АЭ за цикл нагружения, а затем эти значения аппроксимированы полиномиальной линией тренда шестой степени, и получено уравнение этой линии $\Phi(t)$ при соответствующем виде пропорционального и сложного нагружения. Регистрируемые сигналы АЭ соответствуют проявлению дефектов структуры материала, поэтому функция $\Phi(t)$ является показателем дефектности структуры материала конструкции во времени.

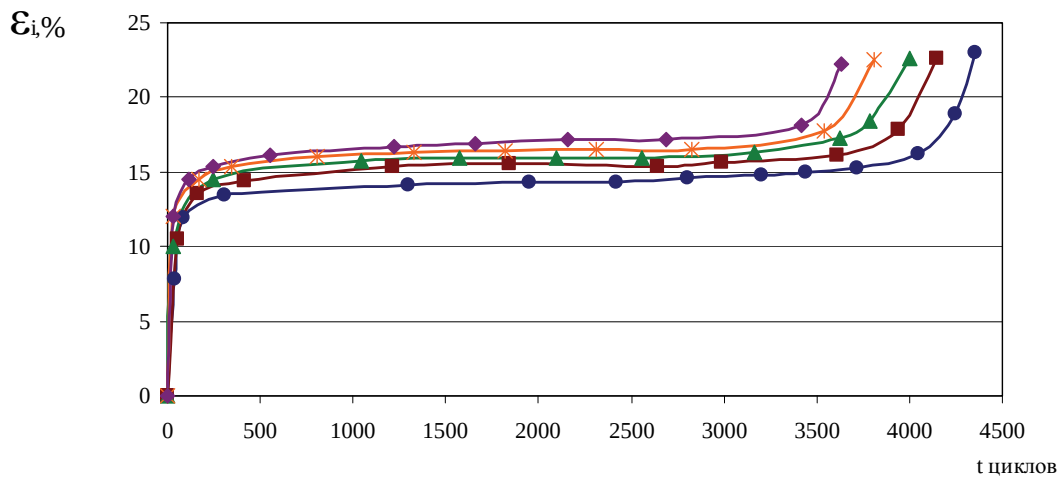


Рис. 2. Диаграмма циклической ползучести сплава Д20 при $\sigma_i = 400$ МПа, $\gamma_u = 0$

- При пропорциональном нагружении по траектории 0-G-C при $\omega=0$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-F-B при $\omega=\pi/2$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-G-B при $\omega^*=0 \leftrightarrow \pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-D-B при $\omega^*=\pi/2 \leftrightarrow \pi/4$

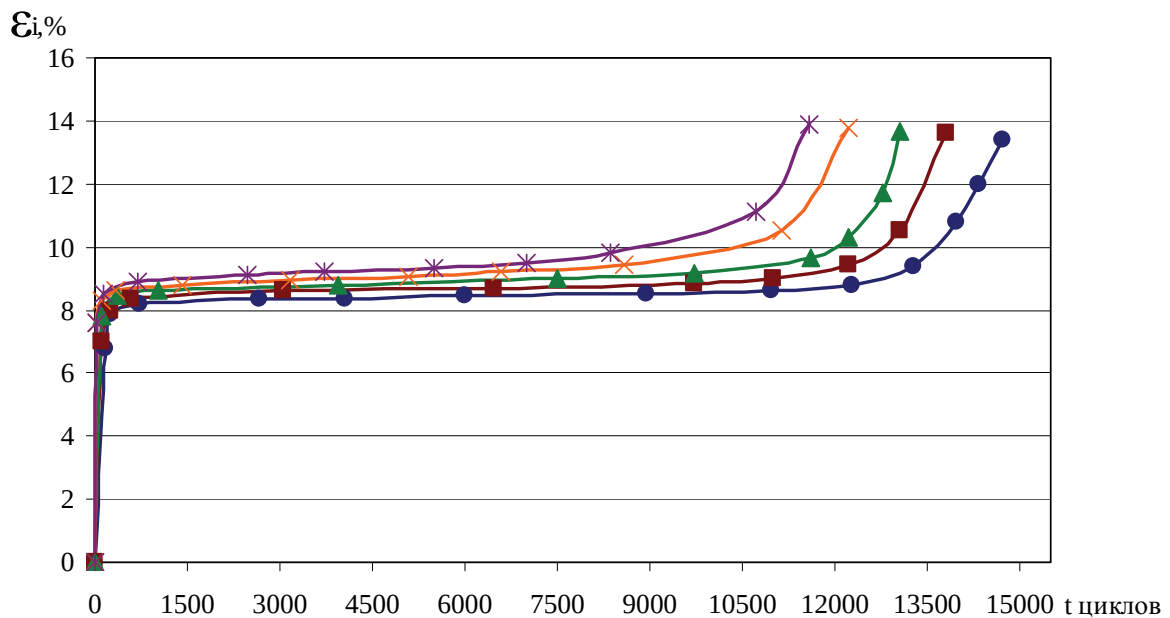


Рис. 3. Диаграмма циклической ползучести для стали 40X при $\sigma_i = 800$ МПа, $\gamma_u = 0$

- При пропорциональном нагружении по траектории 0-G-C при $\omega=0$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-F-B при $\omega=\pi/2$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-G-B при $\omega^*=0 \leftrightarrow \pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-D-B при $\omega^*=\pi/2 \leftrightarrow \pi/4$

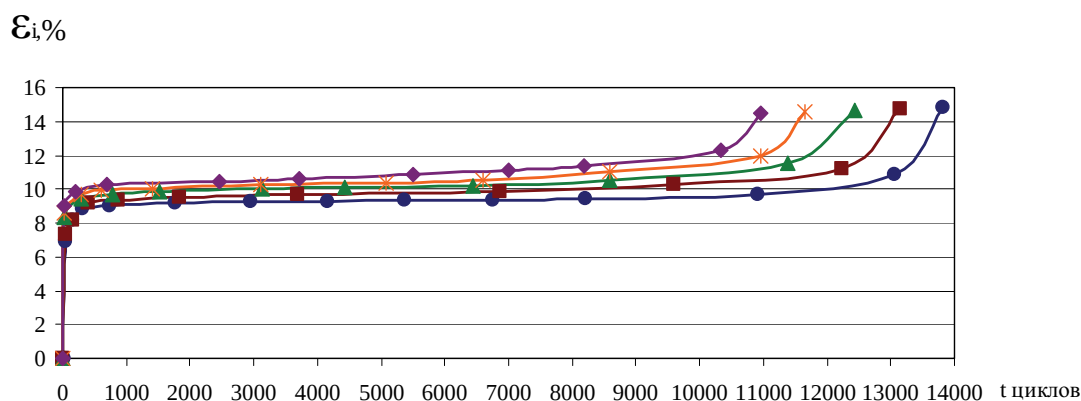


Рис. 4. Диаграмма циклической ползучести сплава ВТ20 при $\sigma_i = 800$ МПа, $r_\sigma = 0$

- При пропорциональном нагружении по траектории 0-G-C при $\omega=0$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-F-B при $\omega=\pi/2$
- ▲— При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$
- *— При сложном нагружении по траектории 0-G-B при $\omega^*=0 \leftrightarrow \pi/4$
- ◆— При сложном нагружении по траектории 0-D-B при $\omega^*=\pi/2 \leftrightarrow \pi/4$

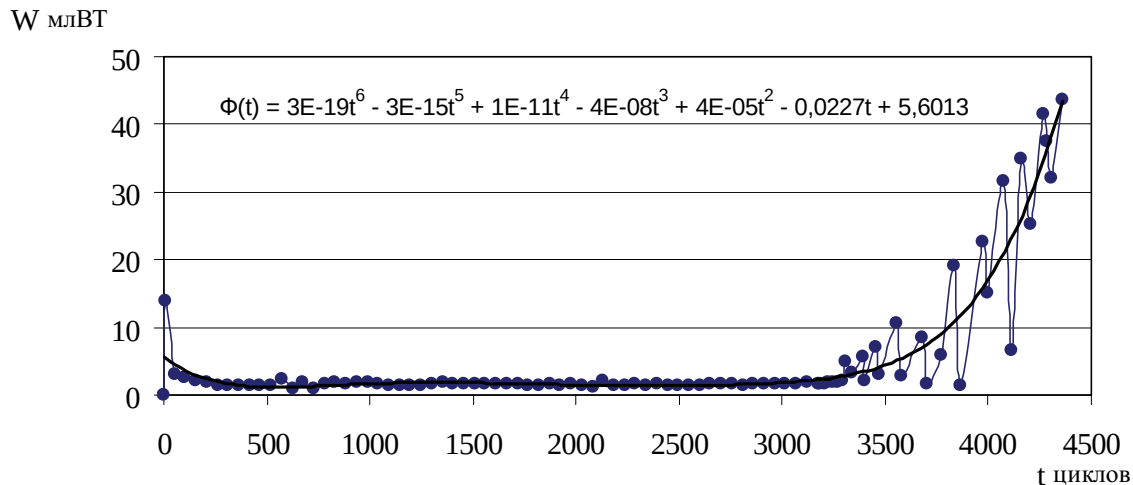


Рис. 5. Диаграмма энергии акустических сигналов, совмещенная с линией тренда для сплава Д20 при $\omega = 0$

- Диаграмма энергии акустических сигналов по каждому циклу нагружения для сплава Д20, $\sigma_i = 400$ МПа при $\omega = 0$;
- Φ(t) линия тренда

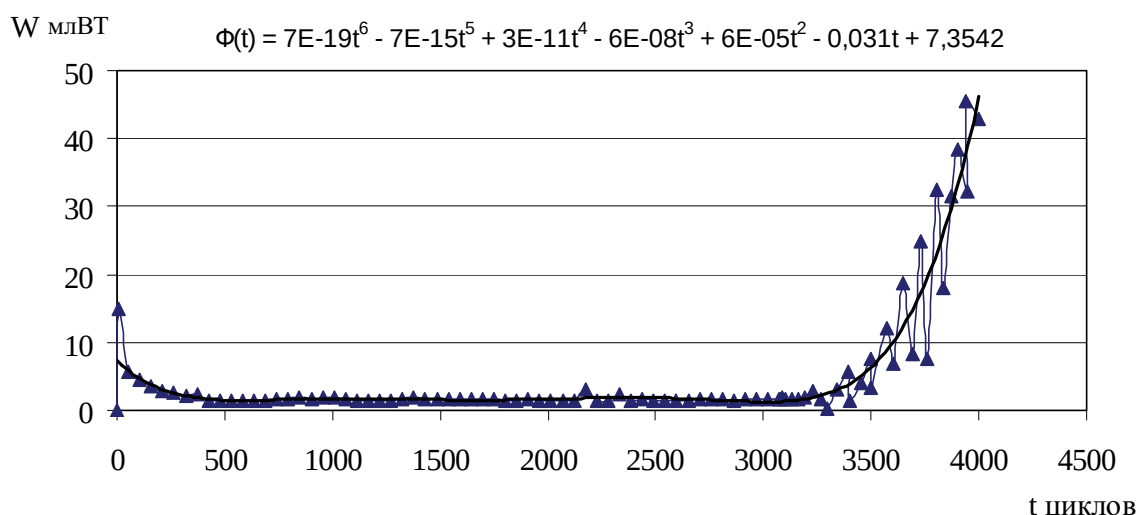


Рис. 6. Диаграмма энергии акустических сигналов, совмещенная с линией тренда для сплава Д20 при $\omega = \pi/4$

- ▲— Диаграмма энергии акустических сигналов по каждому циклу нагружения для сплавов Д20, $\sigma_i = 400$ МПа при $\omega = \pi/4$;
- $\Phi(t)$ линия тренда

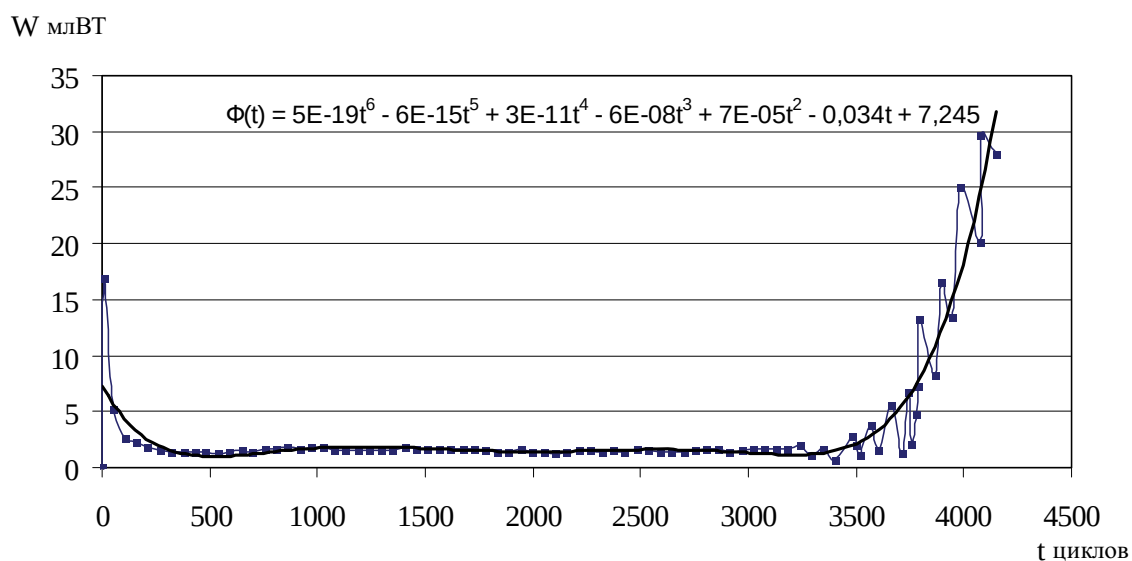


Рис. 7. Диаграмма энергии акустических сигналов, совмещенная с линией тренда для сплава Д20 при $\omega = \pi/2$

- Диаграмма энергии акустических сигналов по каждому циклу нагружения для сплава Д20, $\sigma_i = 400$ МПа при $\omega = \pi/2$;
- $\Phi(t)$ линия тренда

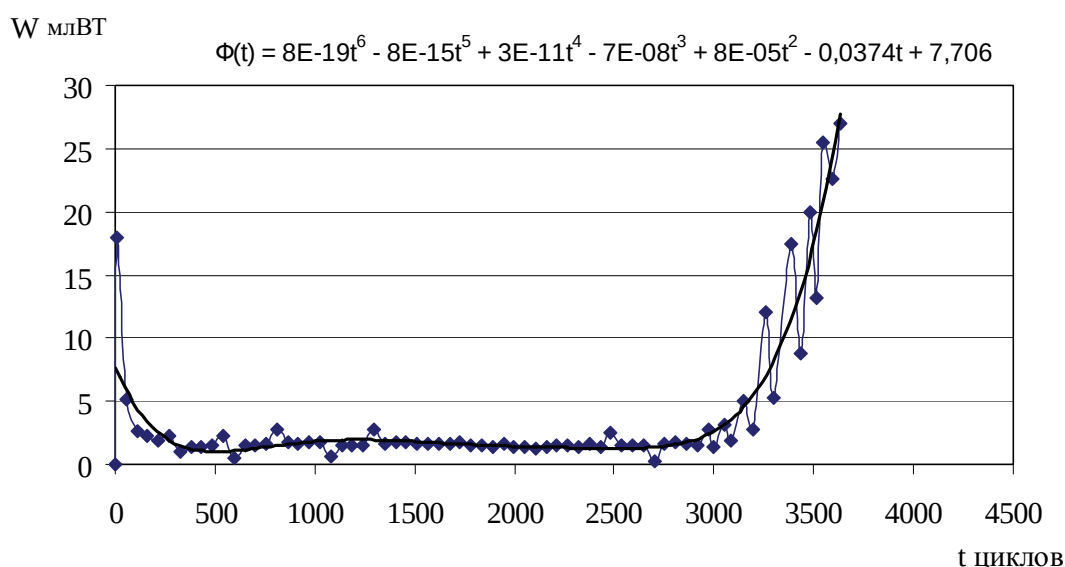


Рис. 8. Диаграмма энергии акустических сигналов, совмещенная с линией тренда для сплава Д20 при $\omega^* = \pi/2 \leftrightarrow \pi/4$

- ◆ Диаграмма энергии акустических сигналов по каждому циклу сложного нагружения для сплава Д20 по траектории 0-D-B при $\omega^* = \pi/2 \leftrightarrow \pi/4$
- $\Phi(t)$ линия тренда

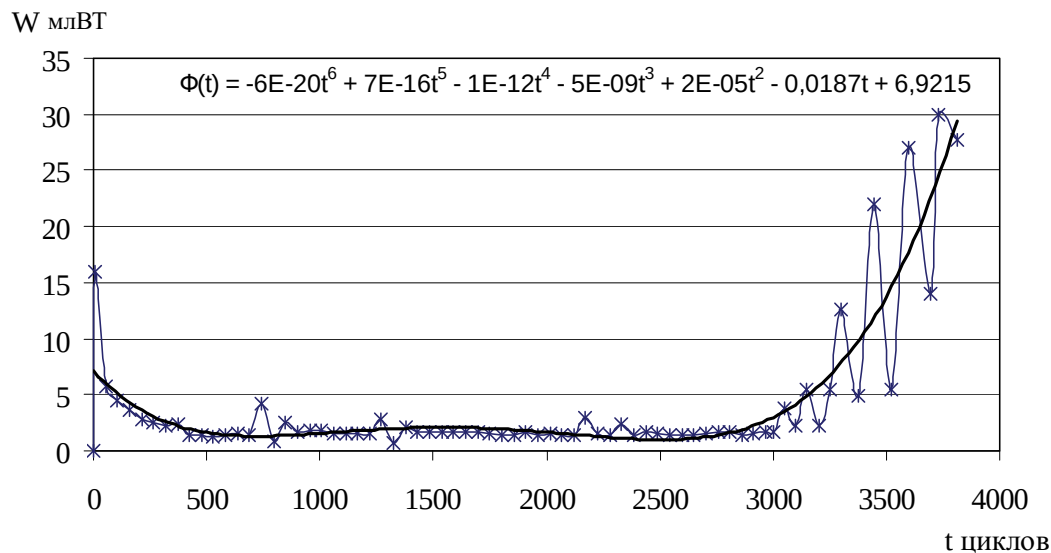


Рис. 9. Диаграмма энергии акустических сигналов, совмещенная с линией тренда для сплава Д20 при $\omega^* = 0 \leftrightarrow \pi/4$

- * Диаграмма энергии акустических сигналов по каждому циклу сложного нагружения для сплава Д20 по траектории 0-G-B, при $\omega^* = 0 \leftrightarrow \pi/4$
- $\Phi(t)$ линия тренда

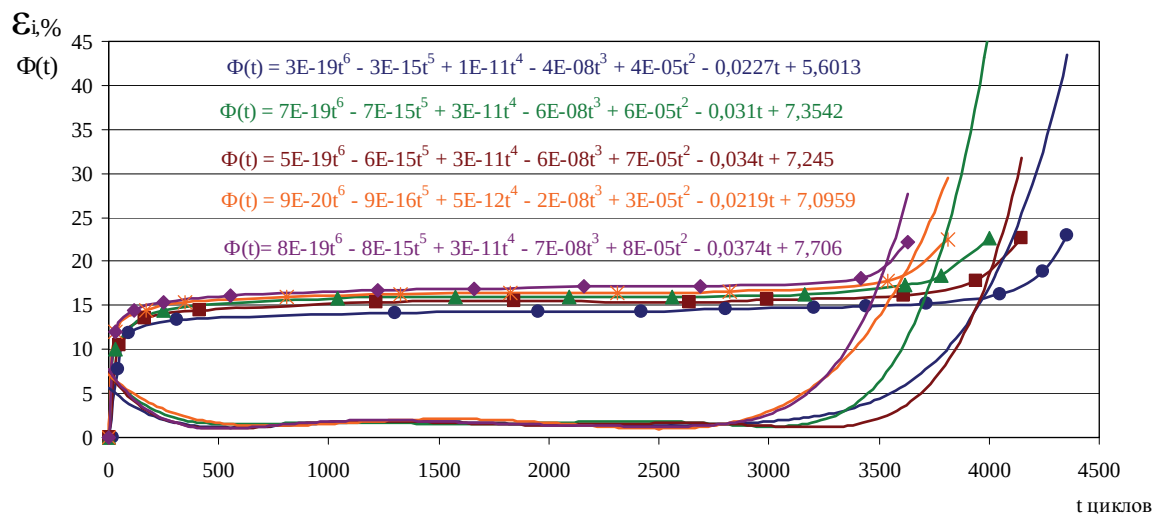


Рис. 10. Диаграмма циклической ползучести сплава Д20 при $\sigma_i = 400$ МПа, $r_u = 0$, совмещенная с $\Phi(t)$ линией тренда энергии акустических сигналов по каждому циклу

- При пропорциональном нагружении по траектории 0-G-C при $\omega=0$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-F-B при $\omega=\pi/2$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-G-B при $\omega^* = 0 \leftrightarrow \pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-D-B при $\omega^* = \pi/2 \leftrightarrow \pi/4$

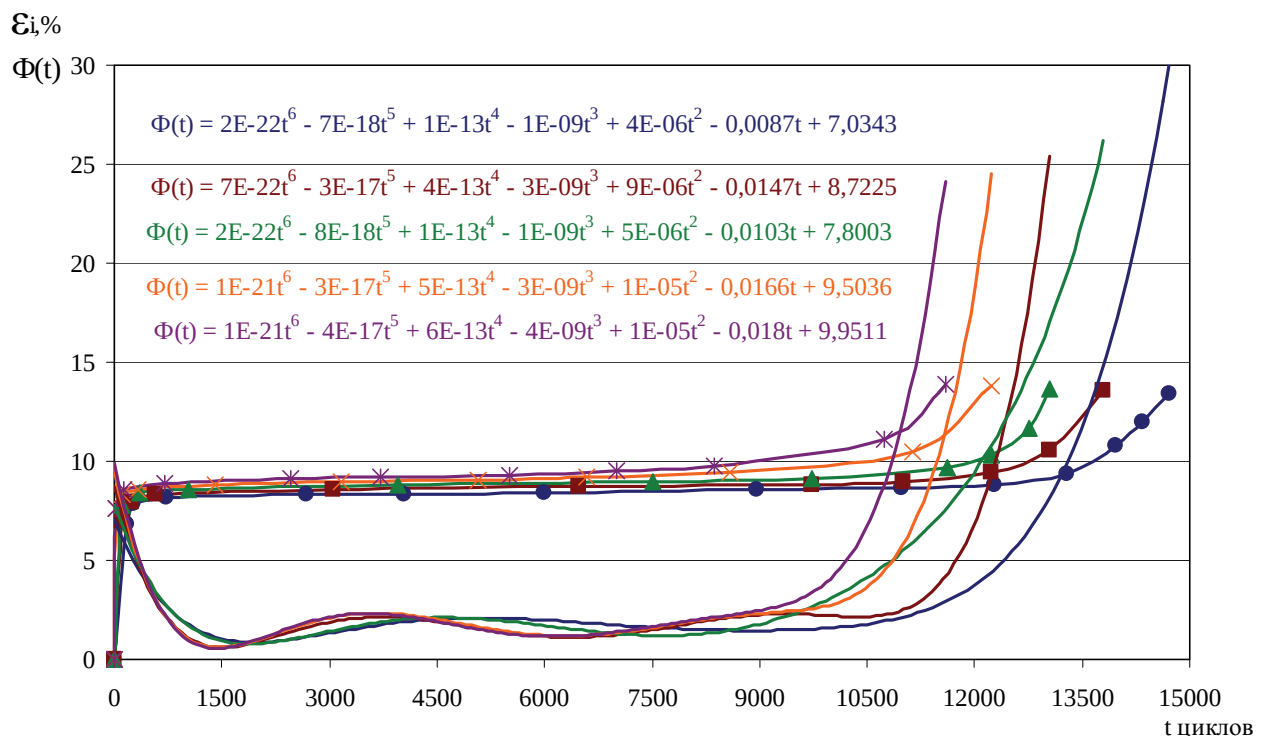


Рис. 11. Диаграмма циклической ползучести для стали 40X при $\sigma_i = 800$ МПа, $r_u = 0$, совмещенная с $\Phi(t)$ линией тренда энергии акустических сигналов по каждому циклу нагружения

- При пропорциональном нагружении по траектории 0-G-C при $\omega=0$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-F-B при $\omega=\pi/2$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$

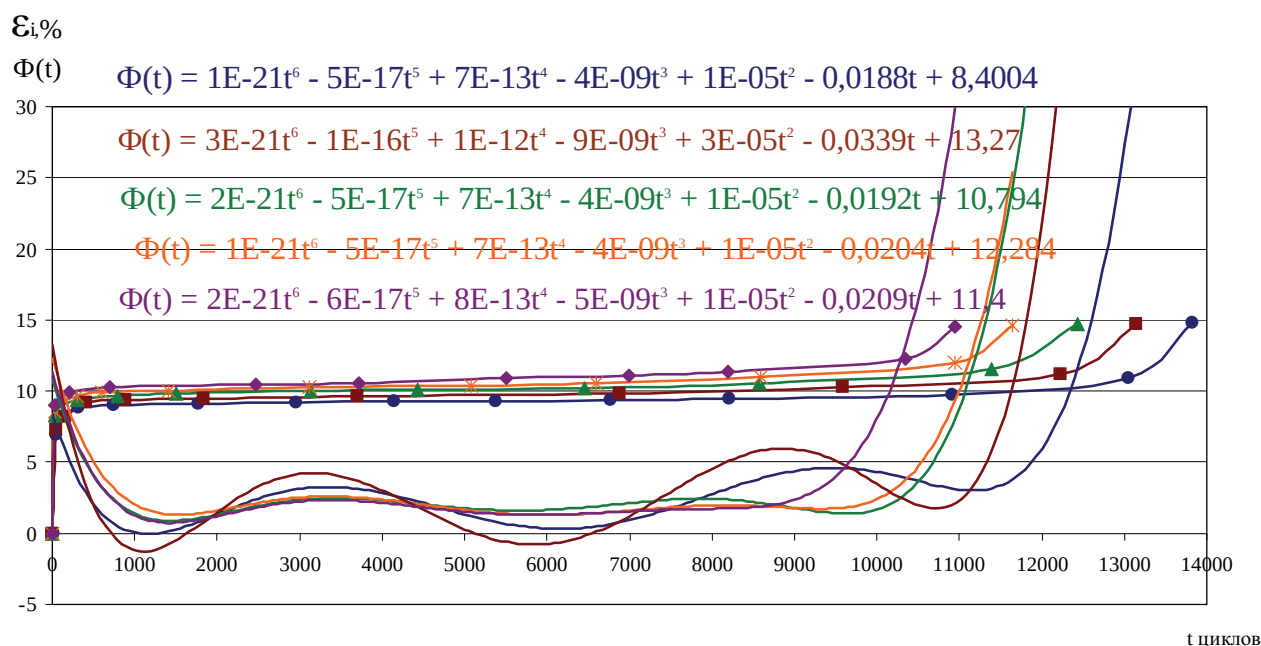


Рис. 12. Диаграмма циклической ползучести сплава ВТ20 при $\sigma_i = 800$ МПа, $\tau_c = 0$, совмещенная с $\Phi(t)$ линией тренда энергии акустических сигналов по каждому циклу нагружения

- При пропорциональном нагружении по траектории 0-G-C при $\omega=0$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-F-B при $\omega=\pi/2$
- При пропорциональном нагружении по траектории 0-D-A при $\omega=\pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-G-B при $\omega^* = 0 \leftrightarrow \pi/4$
- При сложном нагружении по траектории 0-D-B при $\omega^* = \pi/2 \leftrightarrow \pi/4$

При этом можно увидеть дискретность накопления дефектов структурой материалов во времени (см. рис. 10 – 12). Сначала в первом полуцикле получается резкий выброс АЭ (эффект Кайзера) – под воздействием внешней нагрузки происходит перестроение структуры материала и структура приспосабливается воспринимать внешние циклические воздействия (1-10 цикл нагружения). Затем скорость накопления дефектов $\Phi(t)$ стабилизируется, становится минимальной и можно заметить, что минимальная скорость накопления дефектов структурой материала – признак стабильности и работоспособности структуры конструкционных материалов. При увеличении скорости накопления дефектов структурой материала резко увеличивается количество сигналов АЭ (на рис. 13 примерно с 3590 цикла, на рис. 14 – с 12200 цикла, на рис. 15 – с 12350 цикла) и материал конструкции приближается к разрушению. Определить этот момент можно, если построить касательную $y = at + c$ к линии тренда $\Phi(t)$ в точке резкого увеличения количества и энергии акустических сигналов за цикл нагружения.

Современная вычислительная техника позволяет выполнять эту операцию в режиме реального времени. На рис. 13 – 15 касательная $y = at + c$ в точке увеличения АЭ построена, при этом значение $a = 0,47$, $a = 0,48$ и $a = 0,49$ соответственно (скорость накопления дефектов) значительно выше, чем на предыдущем участке.

W млВТ,

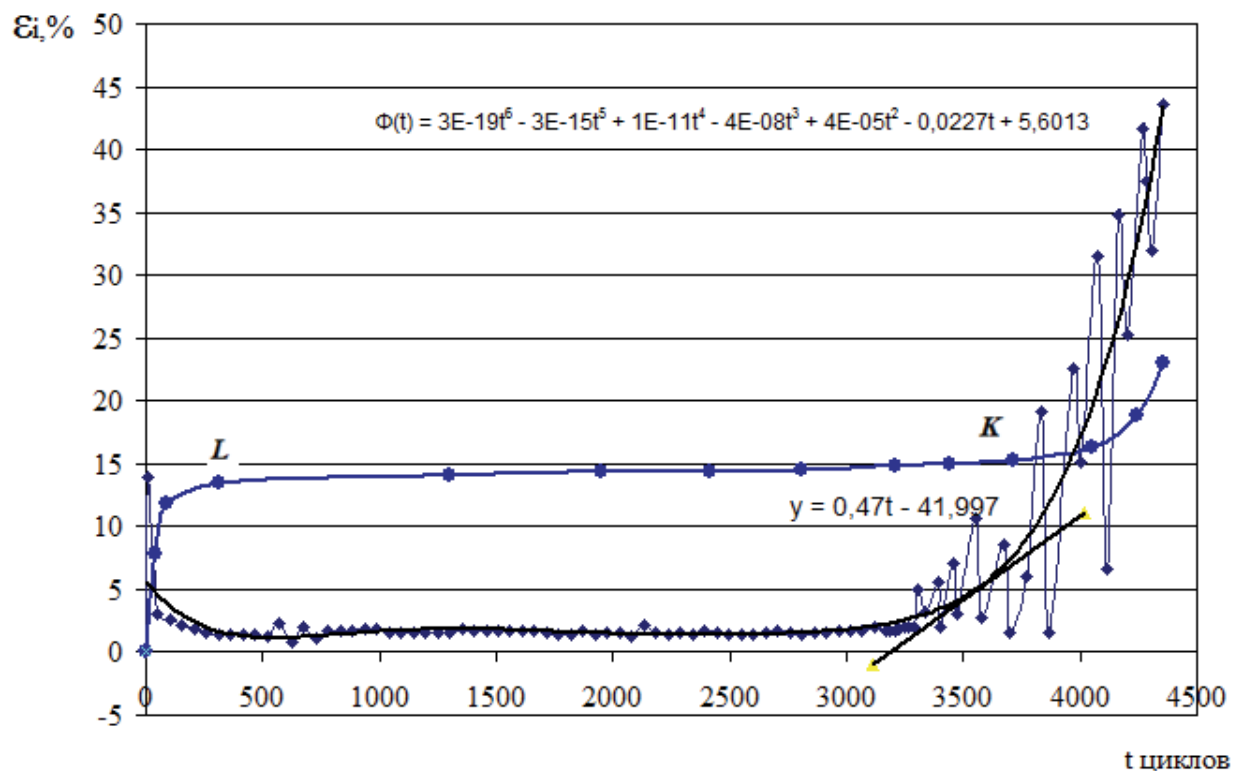


Рис. 13. Совмещенная диаграмма циклической ползучести образца из сплава Д20 при $\omega = 0$, $\sigma_i = 400$ МПа и энергии сигналов акустической эмиссии за цикл нагружения аппроксимированной линией тренда $\Phi(t)$

W млВТ,

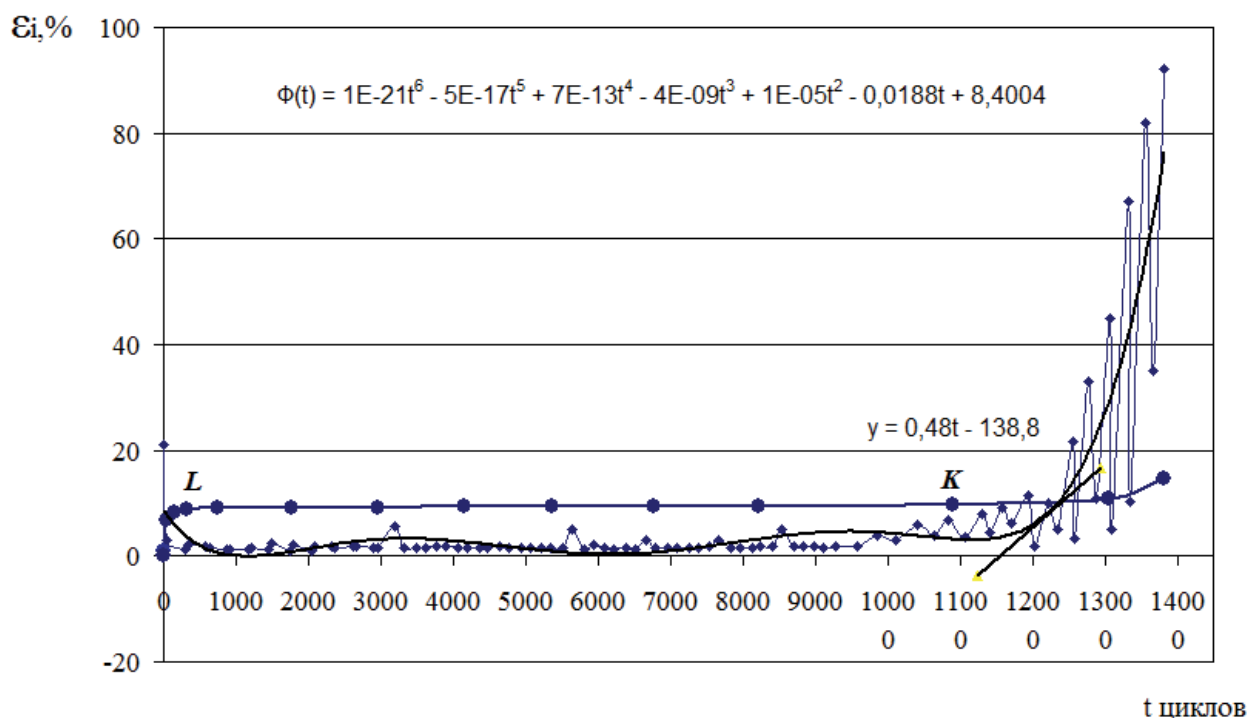


Рис. 14. Совмещенная диаграмма циклической ползучести образца из сплава ВТ20 при $\omega = 0$, $\sigma_i = 800$ МПа и энергии сигналов акустической эмиссии за цикл нагружения аппроксимированной линией тренда $\Phi(t)$

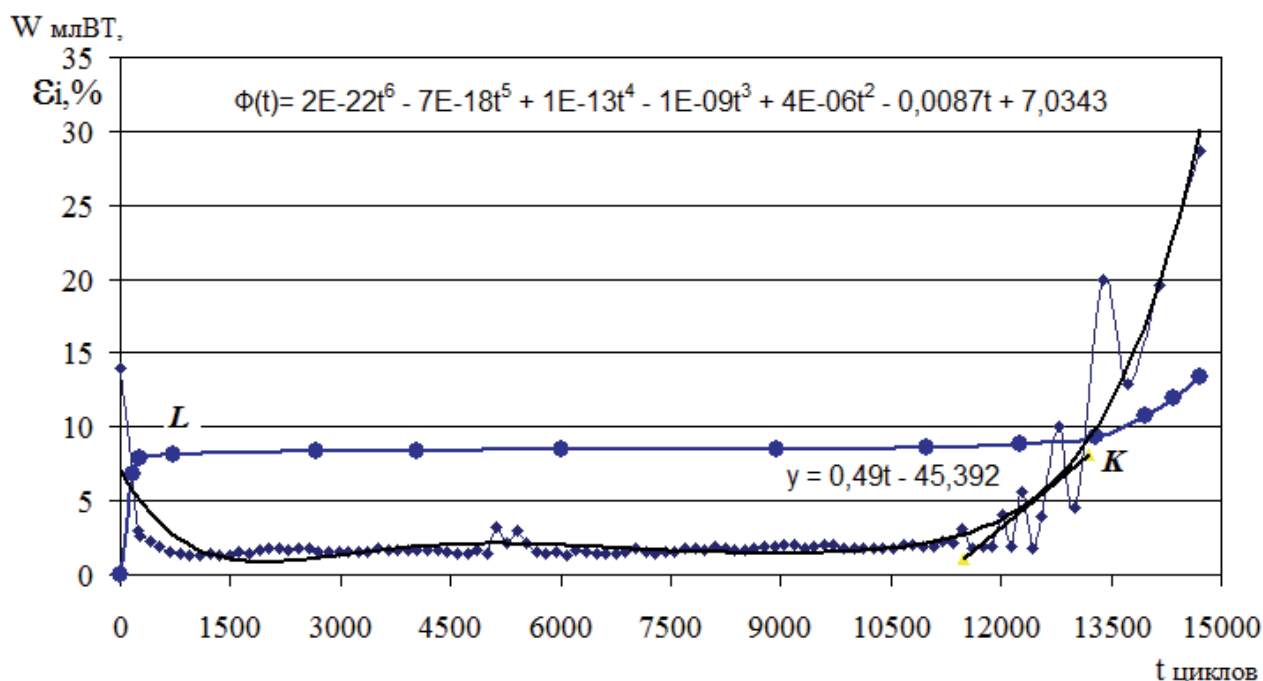


Рис. 15. Совмещенная диаграмма циклической ползучести образца из стали 40Х при $\omega = 0$, $\sigma_i = 800$ МПа и энергии сигналов акустической эмиссии за цикл нагружения аппроксимированной линией тренда $\Phi(t)$

То есть существует возможность определения момента, когда структура материала больше не может стабильно работать и начинает разрушаться, следовательно можно поставить условие:

$$\begin{cases} \dot{\Phi}(t) \leq a = 0.5 \{t_{n-300}; t_n\} \\ W_n \leq \frac{2}{3} W_1 \end{cases},$$

где W_n – величина энергии АС в n-м цикле; W_1 – величина энергии АС в первом цикле нагружения.

Вместе с тем нужно заметить, что скорость изменения дефектности структуры материала $\dot{\Phi}(t)$ необходимо определять в определенном интервале – передвигном окне $\{t_{n-300}; t_n\}$, а не от начала нагружения t_0 , т.к. временная шкала на 3-4 порядка превышает шкалу энергии АС и отклонение энергии будет в пределах погрешности.

Ранее за критерий предельных состояний материала [9] принималась минимальная скорость циклической ползучести (участок L-K диаграммы $\varepsilon - t$, см. рис. 13 – 15), при превышении минимальной скорости ползучести в точке K на рис. 13 – 15 наступало предельное состояние и деталь или конструкция были близки к разрушению.

Разница между критерием минимальной скорости ползучести и критерием минимальной скорости накопления дефектов структурой материала $\dot{\Phi}(t) \leq a$ заключается в том, что возрастание скорости накопления дефектности структуры материала при малоцикловых нагружениях материала начинается значительно раньше, чем нарастание минимальной скорости ползучести (см. рис. 13 – 15). То есть критерий минимальной скорости накопления дефектов структурой материала является более чувствительным и будет более точным при



определении предельных состояний конструкционных материалов, используемых в строительстве и авиастроении.

Выполненный анализ теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о возможности использования метода акустической эмиссии для мониторинга предельных состояний для любых металлических конструкционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дислокационные субструктуры и их трансформация при усталостном нагружении (обзор) / Н. А. Конева, Л. И. Тришкина, О. В. Соснин, В. В. Целермаер, В. В. Коваленко // Известия ВУЗов. Физика, Вып. 3. – № 3. – 2002. – С. 87-98.
2. Сысоев, О. Е. Прогнозирование состояния структуры материалов при циклических нагружениях по сигналам акустической эмиссии / О. Е. Сысоев, Xu Yafeng // Металлургия в машиностроении. – 2011. – № 5. – С. 17-21.
3. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А. Н. Серьёзов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов [и др.]; под ред. Л. Н. Степановой, А. Н. Серьёзова. – М.: Машиностроение, 2008. – 440 с.
4. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, Б. Н. Марьин [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Н. А. Семашко. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
5. Современные испытательные стенды для исследования конструкционных материалов при малоцикловых нагрузках в условиях сложного напряженного состояния с учетом параметров акустической эмиссии / О. Е. Сысоев, Е. А. Кузнецов, В. В. Куриный, Р. В. Шпорт // Ученые записки КнАГТУ. – 2012. – № 1.
6. Сысоев О. Е., Жбанов С. А., Кузнецов Е. А. Программное обеспечение для управления испытательной машиной МИ-40КУ 2009 (ПО «ТМ-40 Manager 2009»). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010613498 2010 г.
7. Сысоев О. Е., Жбанов С. А., Кузнецов Е. А. Программное обеспечение для регистрации сигналов акустической эмиссии «AERecoder 2009» (ПО «AERecoder 2009»). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2010613499 2010 г.
8. Сысоев, О. Е. Новые критерии предельных состояний конструкционных материалов определяемые по параметрам акустической эмиссии / О. Е. Сысоев // Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 9. – С. 43-47.
9. Можаровский, Н. С. Ползучесть и долговечность материалов при программном нагружении / Н. С. Можаровский, Е. А. Антипов, Н. И. Бобырь. – Киев: Вища шк. Изд-во при Киев. ун-те. 1982. – 130 с.