

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

Феоктистов С. И., Белых С. В., Погарцева М. М.
S. I. Feoktistov, S. V. Belykh, M. M. Pogartseva

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ИЗГИБА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

DEFINING THE GEOMETRY OF PROCESSES USED TO PRODUCE AIRCRAFT COMPONENTS FROM EXTRUDED SECTIONS BY THE METHOD OF BENDING FOLLOWED BY MILLING

Феоктистов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, декан самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8(4217)241190. E-mail: ssf@knastu.ru

Mr. Sergey I. Feoktistov – Doctor of Engineering, Professor, Dean of the Aircraft Building Faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina av.; 8(4217)241190. E-mail: ssf@knastu.ru

Белых Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, пр. Ленина, 27; 89141795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru

Mr. Sergey V. Belykh – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Aviation Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina av.; 89141795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru

Погарцева Мария Михайловна – аспирантка кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 89242221401. E-mail: marry_pog@mail.ru

Ms. Mariya M. Pogartseva – PhD Candidate, Department of Aviation Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina av.; 89242221401. E-mail: marry_pog@mail.ru

Аннотация. В статье приведены расчеты величин пружинения при изгибе после снятия нагрузки и при последующей механической обработке (фрезеровании). Представлен алгоритм определения требуемого радиуса изгиба для получения на выходе детали, соответствующей электронной модели (ЭМ) или чертежу.

Summary. The paper offers the calculation of spring back values as obtained during bending after load removal and during subsequent machining (milling). An algorithm is presented that determines the bending radius required to obtain a part which corresponds to a digital model or drawing.

Ключевые слова: прессованный профиль, изгиб, фрезерование, пружинение, остаточные напряжения.

Key words: extruded section, bending, milling, spring back, residual stress.

УДК 621.73

Детали из металлического профиля находят широкое применение при изготовлении конструкций в авиационной промышленности. Для изготовления таких деталей на производстве отработаны и применяются различные технологические операции. Особый интерес представляет исследование технологического процесса изготовления длинномерных деталей малой кривизны из прессованных профилей. Наличие в деталях таких конструктивных эле-

Феоктистов С. И., Белых С. В., Погарцева М. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ИЗГИБА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

ментов, как фестоны, обнижения по высоте и толщине профиля, а также изменение кривизны детали по длине, требует применения при их изготовлении двух разнородных технологических операций, таких как изгиб и фрезерование.

Традиционная технология изготовления деталей из профилей ведется следующим образом: предварительно исходный профиль фрезеруют до получения заданной конфигурации, после чего полученные заготовки проходят операции гибки и малковки. Однако технологический процесс можно представить следующим образом: заготовки предварительно изгибают по программе, с учетом необходимой малковки и закручивания, а после чего фрезеруют по контуру в соответствии с формой детали с использованием высокоточных многокоординатных фрезерных станков.

После проведения технологической операции изгиба и снятия нагрузки кривизна детали изменится – деталь пружинит. При проведении процесса фрезерования изогнутой детали происходит перераспределение остаточных напряжений и деталь также изменяет свою кривизну. Решение задачи определения радиуса изгиба заготовки с учетом её формоизменения на этапах гибки и фрезерования позволит получить деталь, соответствующую её ЭМ или чертежу.

На рис. 1 представлена геометрическая модель поперечного сечения заготовки в виде сочетания прямоугольных участков. Такая модель позволяет получать решения задачи в общем виде для различного сортамента профилей (см. рис. 1, в). Исходной информацией для расчетов по данной модели являются геометрические размеры поперечного сечения профиля, изображенные на рис. 1, б. В случае отсутствия какого-либо прямоугольного участка соответствующие ему размеры задаем равными нулю.

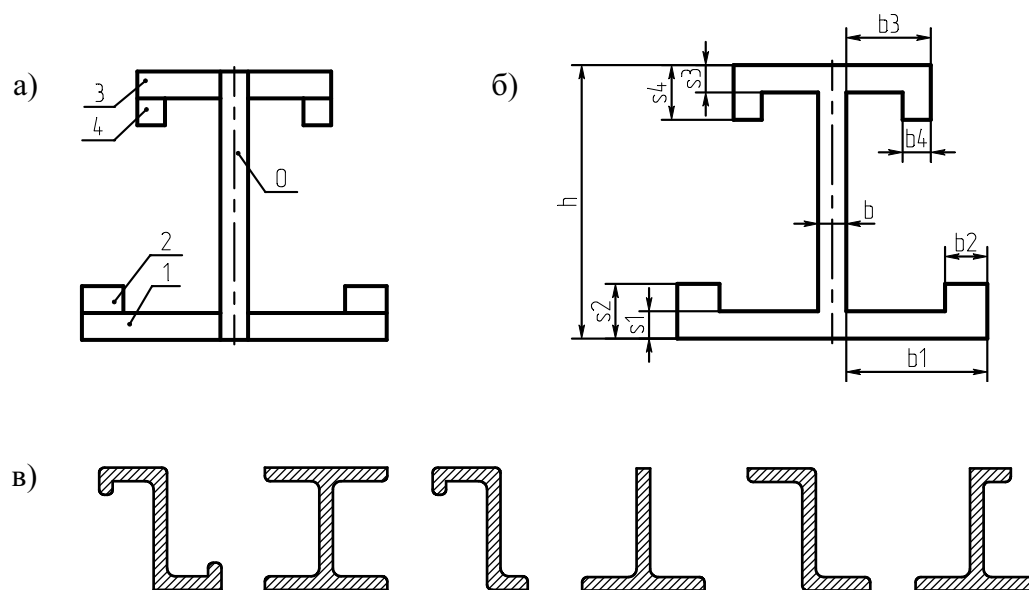


Рис. 1. Геометрическая модель сечения заготовки: а – разбиение сечения на прямоугольные участки; б – расчетная схема сечения; в – варианты поперечных сечений профилей

При изгибе исходной заготовки на радиус $R_{изг}$ (см. рис. 2) положение заготовки в процессе пружинения после снятия нагрузки по окончании операции гибки будет соответствовать радиусу $R_{ост}$ (см. рис. 2). Для определения его значения необходимо знать положение нейтрального слоя при изгибе $Y_{нс}$ (см. рис. 2, 3), которое определяем из условия равновесия внутренних сил в поперечном сечении заготовки [2]:

$$\int_{(F_{раст})} \sigma dF = \int_{(F_{сж})} \sigma dF,$$

где $F_{\text{раст}}$, $F_{\text{сж}}$ – соответственно площади растянутой и сжатой областей сечения заготовки; σ – напряжения.

На рис. 3 представлена блок-схема определения положения нейтрального слоя.

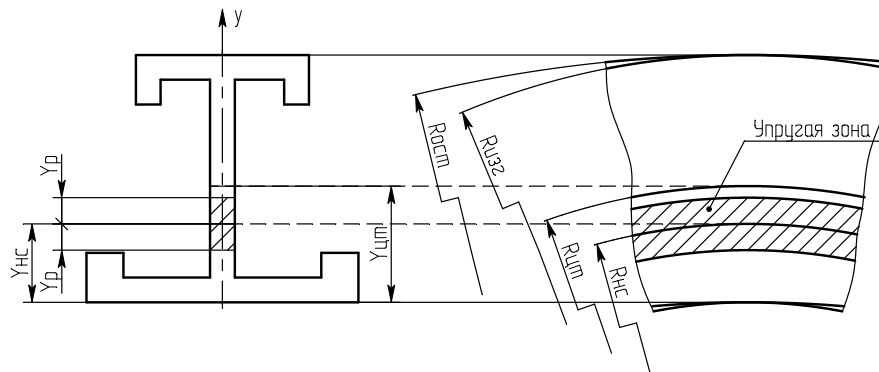
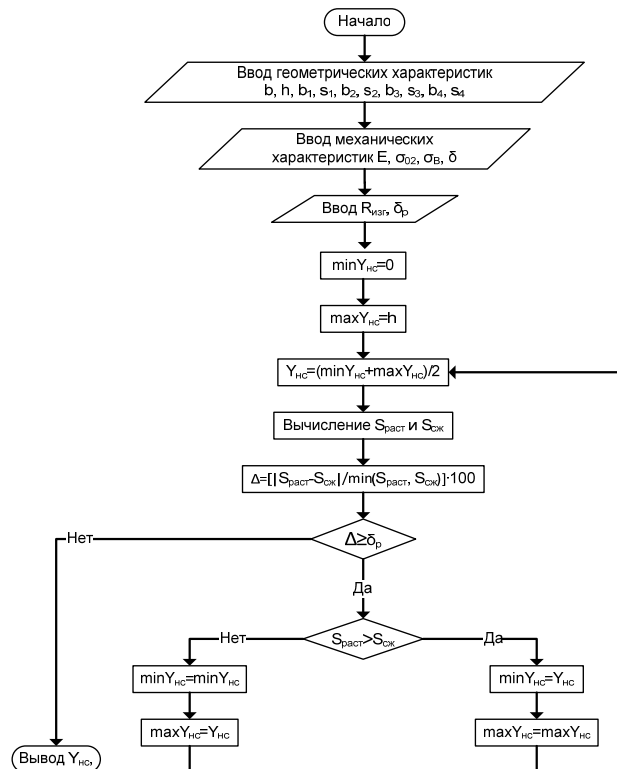


Рис. 2. Положение нейтрального слоя $y_{\text{НС}}$ и центра тяжести $y_{\text{ЦТ}}$ поперечного сечения заготовки



$$S_{\text{раст}} = \int_{(F_{\text{раст}})} \sigma dF; \quad S_{\text{сж}} = \int_{(F_{\text{сж}})} \sigma dF.$$

Рис. 3. Блок-схема определения положения нейтрального слоя

Остаточный радиус $R_{\text{ост}}$ кривизны заготовки после разгрузки определяется по формуле

$$R_{\text{ост}} = \frac{1}{\chi_{\text{ост}}} + (h - y_{\text{ЦТ}}),$$

Феоктистов С. И., Белых С. В., Погарцева М. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ИЗГИБА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

где $\chi_{ост}$ – остаточная кривизна относительно слоя, проходящего через центр тяжести поперечного сечения заготовки; h – высота поперечного сечения заготовки (см. рис. 1, б); $Y_{цт}$ – положение центра тяжести поперечного сечения заготовки (см. рис. 2).

Остаточная кривизна определяется выражением

$$\chi_{ост} = \frac{1}{R_{цт}} - \chi_{фик},$$

где $\chi_{фик}$ – фиктивная кривизна относительно слоя, проходящего через центр тяжести поперечного сечения заготовки.

Фиктивная кривизна определяется выражением [1]

$$\chi_{фик} = \chi_{нс} \cdot \frac{J_{упр}}{J_{цт}} + \chi_{нс}^n \cdot \frac{J_{пл}}{J_{цт}},$$

где $J_{упр}$ – момент инерции упруго-деформированной зоны поперечного сечения заготовки относительно нейтрального слоя; $J_{пл}$ – приведенный момент инерции пластически деформированных зон поперечного сечения заготовки относительно нейтрального слоя; $J_{цт}$ – момент инерции всей площади поперечного сечения заготовки относительно слоя, проходящего через центр тяжести сечения.

Величина остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в пластически изогнутой заготовке определяется выражением

$$\sigma_{ост} = \sigma_{изг} - \sigma_{фик},$$

где $\sigma_{изг}$ – напряжения изгиба (истинные напряжения); $\sigma_{фик}$ – фиктивные напряжения в поперечном сечении заготовки.

Согласно теореме Ильюшина о разгрузке, истинное состояние равновесия соответствует задаче пластичности и выражает соотношение между кривизной нейтрального слоя и внешним изгибающим моментом в соответствующем сечении, фиктивное состояние равновесия соответствует задаче упругости и выражает соотношение между изгибающим моментом и фиктивной кривизной слоя, проходящего через центр тяжести сечения при изгибе.

На рис. 4 показано распределение напряжений по высоте поперечного сечения заготовки. Следует отметить, что суммарный момент остаточных напряжений относительно центра тяжести сечения должен быть равен нулю.

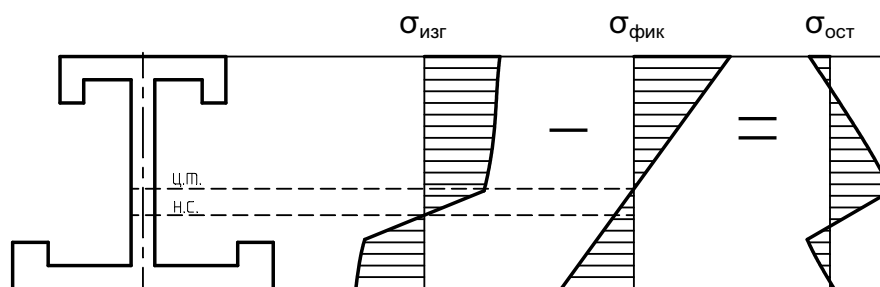


Рис. 4. Эпюры напряжений в поперечном сечении заготовки в процессе изгиба и снятия нагрузки

Следующий этап технологического процесса – фрезерование изогнутой заготовки в соответствии с формой детали. На рис. 5 показаны возможные варианты удаления части материала заготовки, форма и положение центра тяжести $Y_{цт}^{\phi}$ нового сечения.

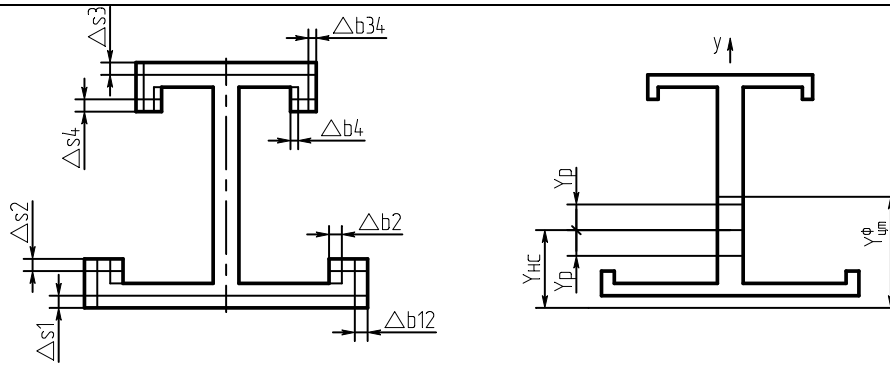


Рис. 5. Схема поперечного сечения заготовки после фрезерования

Уменьшение размеров поперечного сечения заготовки приведет к нарушению равновесия остаточных напряжений в изогнутой заготовке. Возникающие неуравновешенные внутренние силы вызовут дальнейшее пружинение заготовки и переход её в иную стабильную форму. При этом изменится кривизна изгиба, а остаточные напряжения в полученном поперечном сечении детали перейдут в новое равновесное состояние.

Для определения положения заготовки после фрезерования необходимо вычислить изгибающий момент внутренних сил $M_{\text{ост}}$ полученного поперечного сечения детали, который без учёта влияния режущего инструмента на распределение внутренних напряжений определяется выражением

$$M_{\text{ост}} = \int_{(F_{\phi})} \sigma_{\text{ост}} \cdot (y_{\text{цт}}^{\phi} - y) dF,$$

где F_{ϕ} – площадь поперечного сечения заготовки после фрезерования.

В результате действия момента $M_{\text{ост}}$ произойдет пружинение изогнутой отфрезерованной заготовки. При этом созданная после формообразования заготовки кривизна изменится на величину $\chi_{\text{фик}}^{\phi}$.

Таким образом, радиус, принимаемый готовой деталью, определится по формуле

$$R_{\text{ост}}^{\phi} = \frac{1}{\chi_{\text{ост}}^{\phi}} + (h - y_{\text{цт}}^{\phi}),$$

где $\chi_{\text{ост}}^{\phi}$ – остаточная кривизна слоя, проходящего через центр тяжести поперечного сечения заготовки после фрезерования.

Остаточная кривизна после фрезерования определяется выражением

$$\chi_{\text{ост}}^{\phi} = \frac{1}{R_{\text{цт}}^{\phi}} - \chi_{\text{фик}}^{\phi},$$

где $\chi_{\text{фик}}^{\phi}$ – фиктивная кривизна слоя, проходящего через центр тяжести поперечного сечения заготовки после фрезерования.

Фиктивная кривизна после фрезерования определяется выражением

$$\chi_{\text{фик}}^{\phi} = \frac{M_{\text{ост}}}{E \cdot J_{\text{цт}}^{\phi}},$$

где $J_{\text{цт}}^{\phi}$ – момент инерции площади поперечного сечения заготовки после фрезерования относительно слоя, проходящего через центр тяжести сечения отфрезерованной заготовки.

Распределение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^{\phi}$ в поперечном сечении заготовки после фрезерования определяется выражением

Феоктистов С. И., Белых С. В., Погарцева М. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ИЗГИБА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

$$\sigma_{ост}^{\phi} = \sigma_{ост} - \sigma_{фик}^{\phi}$$

где $\sigma_{фик}^{\phi}$ – фиктивные напряжения в поперечном сечении заготовки после фрезерования.

На рис. 6 показано распределение напряжений в поперечном сечении заготовки до и после фрезерования.

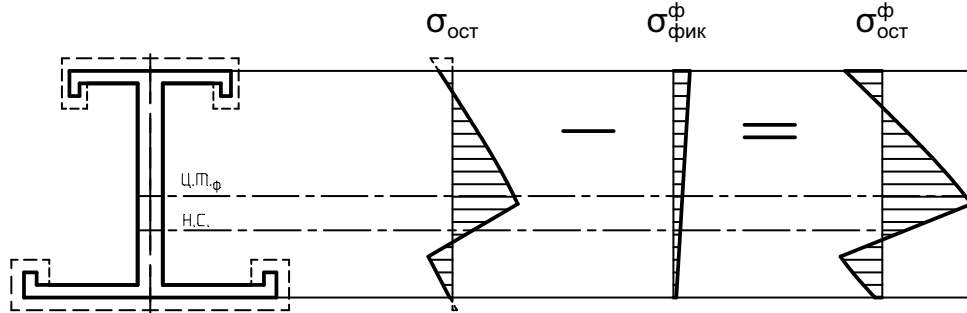


Рис. 6. Эпюры напряжений в поперечном сечении заготовки до и после фрезерования

Приведенные результаты являются решением задачи определения конечной формы детали при изготовлении её методом гибки заготовки на заданный радиус с последующим фрезерованием. Для решения задачи в первоначальной постановке разработан алгоритм определения требуемого радиуса изгиба, который показан на рис. 7.

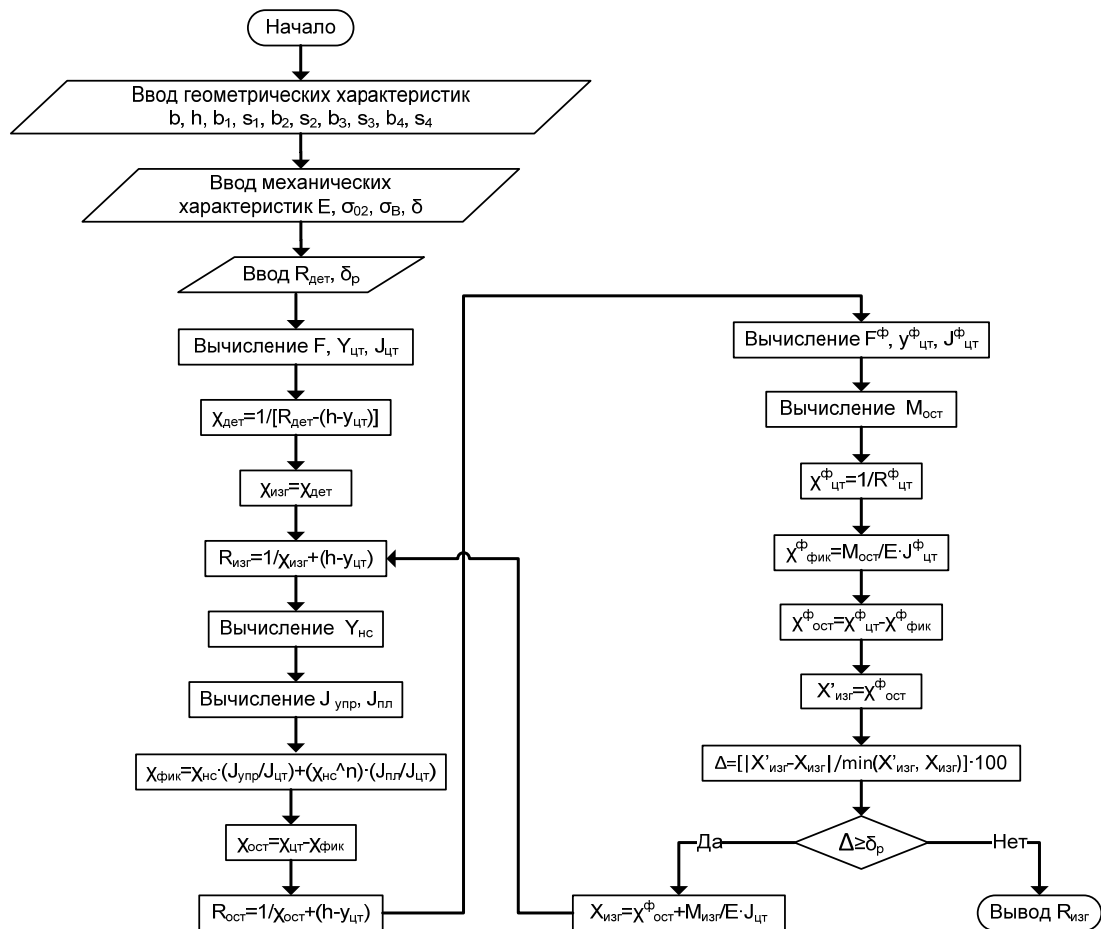


Рис. 7. Блок-схемы определения радиуса изгиба с учетом пружинений при изгибе и последующем фрезеровании

По данному алгоритму в среде MathCAD проведены расчеты для двух типовых сечений стрингера самолета SSJ-100, получаемых фрезерованием из профиля одинакового сечения (см. рис. 8).

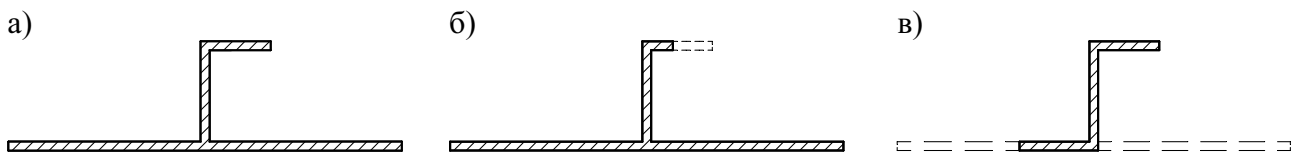


Рис. 8. Типовые формы сечений стрингера самолета SSJ-100:
а – сечение заготовки; б – типовое сечение I; в – типовое сечение II

Результаты расчетов по определению требуемой линии изгиба для получения заданной детали представлены на рис. 9.

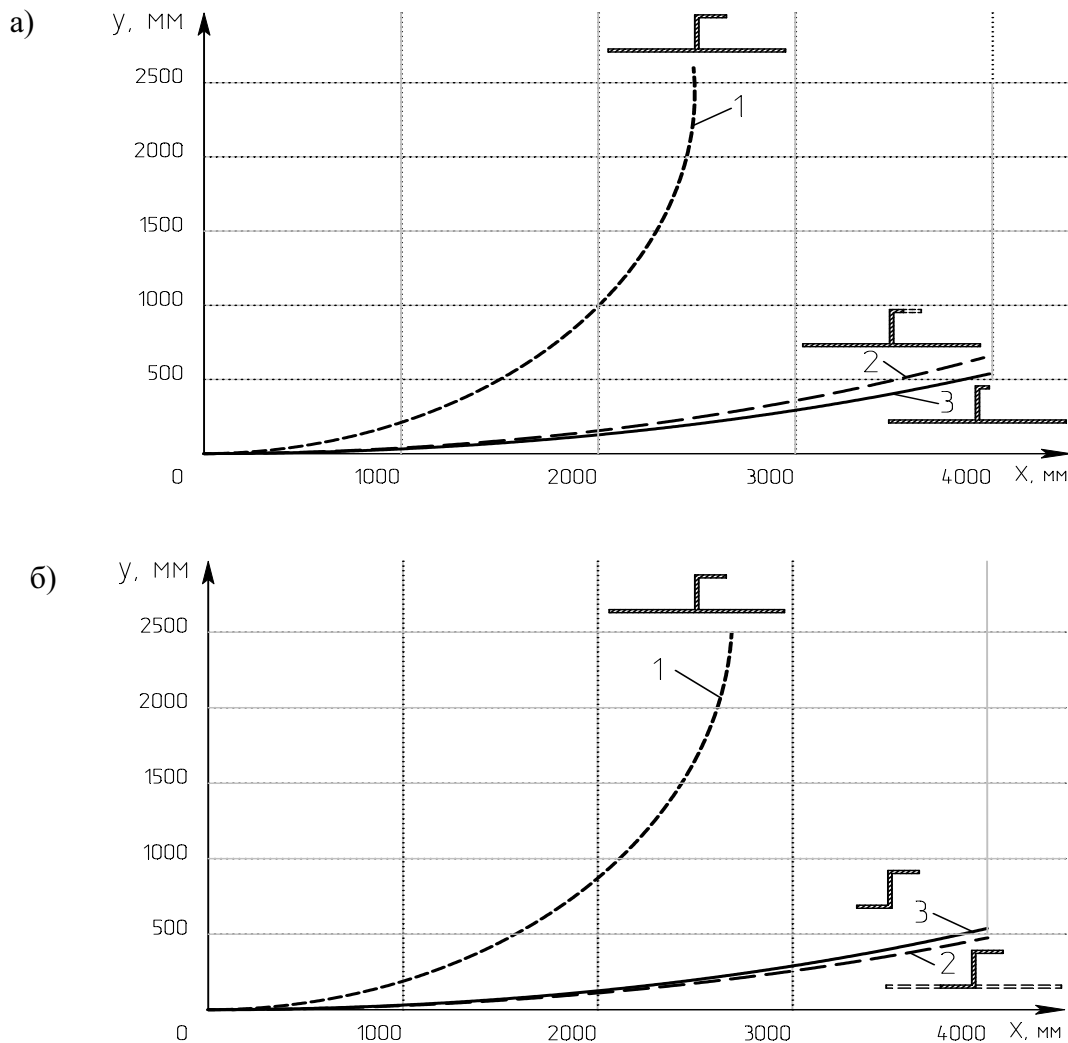


Рис. 9. Положение заготовки в процессе изготовления детали:
а – типовое сечение I; б – типовое сечение II: 1 – линия изгиба, проходящая через центры тяжести сечений исходной заготовки; 2 – линия изогнутой заготовки, проходящая через центры тяжести сечений заготовки после снятия нагрузки; 3 – линия изогнутой заготовки после фрезерования, проходящая через центры тяжести сечений фрезерованной заготовки, соответствующая ЭМ и чертежу детали

Феоктистов С. И., Белых С. В., Погарцева М. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ИЗГИБА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

Как видно из рис. 9, в процессе фрезерования в зависимости от формы сечения конечной детали, кривизна заготовки может увеличиваться (см. рис. 9, а) или уменьшаться (см. рис. 9, б).

Расчет кривизн в точках контура реального профиля рассчитывается в соответствии с методикой, изложенной в статье [3].

Заключение

В ходе работы в среде MathCAD создана программа, позволяющая рассчитать геометрические параметры технологического процесса получения деталей летательных аппаратов из прессованных профилей методом изгиба с последующим фрезерованием. Однако добиться точного изготовления таких деталей, полностью соответствующих их ЭМ и чертежам, невозможно. Это связано, во-первых, с расхождением значений механических характеристик материала заготовки, используемых в расчетах, со справочными (разные поставщики, разные партии). Во-вторых, на результат деформирования влияют расхождения геометрических параметров в пределах допуска. Несмотря на данные недостатки, учет пружинения в процессе производства позволяет повысить точность изготовления деталей и значительно снизить трудоемкость доводочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысов, М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методом гибки / М. И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 240 с.
2. Феоктистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности / С. И. Феоктистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 184 с.
3. Аппроксимация геометрии контура дугами при контроле точности изготовления деталей летательных аппаратов / С. И. Феоктистов, С. В. Белых, А. А. Кривенко, А. А. Перевалов // Ученые записки КнАГТУ. Наука о природе и технике. – 2010. – № I-1(1) – С. 9-15.

ЭНЕРГЕТИКА
POWER ENGINEERING

Петухов А. М., Кузьмин В. М., Дубровский И. Н.
A. M. Petukhov, V. M. Kuzmin, I. N. Dubrovskiy

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНОГО
ЗАЗОРА И ЭДС ФАЗ СОВМЕЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА**

**MAGNETIC FIELD FORMATION IN THE AIR GAP AND THE EMF OF THE PHASES
OF A COMBINED ELECTRIC GENERATOR**



Петухов Анатолий Михайлович – соискатель кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru

Mr. Anatoly M. Petukhov – PhD Applicant, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru



Кузьмин Вячеслав Матвеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). 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). E-mail: kem@knastu.ru



Дубровский Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru

Mr. Igor N. Dubrovskiy – PhD in Engineering, Assistant Professor, Military Training Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности формирования магнитного поля совмещенного электромашинного генератора в автономном источнике электрического напряжения стабильной частоты.

Summary. The paper offers data on the formation of magnetic field of a combined electric generator within an independent source of a stable-frequency electric potential.

Ключевые слова: автономное электропитание.

Key words: independent power supply.

УДК 621.311:621.314.5

Использование в системах автономного электропитания электрических машин с совмещенной магнитной системой [1] создает предпосылки для более подробного исследования процессов, происходящих в них во время их работы.

Решающее влияние на свойства машины оказывает распределение магнитной индукции в зазоре электрической машины, для расчета которого необходимо знать распределение магнитодвижущей силы (МДС) в зазоре и вдоль контура якоря.

Распределение МДС зависит в основном от распределения проводников и токов на поверхности статора и ротора, а также от размеров зазора. Несколько меньшее, но достаточно существенное влияние оказывает насыщение магнитопровода электрической машины, анизотропия листов сердечника и некоторые другие параметры.

В настоящей статье акцентируем внимание на особенностях магнитного поля электромашинного генератора с совмещенной магнитной системой, созданного на основе асинхронного двигателя с фазным ротором.

Электромашинный генератор состоит из двух асинхронных машин, установленных на одном валу и расположенных в одном корпусе [2]. Роторные обмотки машин подключены к роторной обмотке асинхронного возбудителя (АВ) таким образом, что одна из них работает в режиме электромагнитного тормоза (ЭМТ), а другая – в режиме асинхронного генератора (АГ). Роторные и статорные обмотки машин выполнены в виде трехфазной обмотки. Вращение ротора осуществляется с помощью сторонней механической силы.

Для возбуждения поля в АВ питание его статорных обмоток осуществляется трехфазной симметричной системой токов с частотой ω_1 , которая создает магнитный поток статора, вращающийся с угловой скоростью ω_1/p_1 , где p_1 – число пар полюсов обмотки возбудителя.

При вращении ротора во встречном направлении к полю статора с угловой скоростью ω' скорость вращения магнитного поля статора относительно ротора АВ: $\omega_1/p_1 + \omega'$.

Вращающееся магнитное поле индуцирует в роторной обмотке АВ ЭДС, изменяющуюся с угловой частотой

$$\omega_B = (\omega_1 / p_1 + \omega') p_1 = \omega_1 + \omega' p_1 . \quad (1)$$

Знак плюс в этом выражении означает встречное направление вращения ротора и поля статора.

Нагрузкой для роторной обмотки возбудителя являются роторные обмотки ЭМТ и АГ. Под воздействием ЭДС в обмотках ротора ЭМТ и АГ протекают токи с частотой ω_B .

В описываемой системе мы имеем трехфазные симметричные системы токов и напряжений, а также симметрично расположенные трехфазные обмотки переменного тока с пространственным смещением между их осями на $2\pi/3$. Поэтому, питая обмотки трехфазным синусоидальным напряжением, сдвинутым между фазами на $2\pi/3$ периода по времени, мы получаем три синусоидальных пульсирующих поля, смещенных во времени и пространстве на $2\pi/3$.

Как известно из теории электрических машин, такая система пульсирующих полей создает синусоидальное вращающееся поле (см. рис. 1).

Выражение для волны вращающегося поля:

$$B(t, a) = B_m \cos(\omega t \pm p a),$$

где $a = \frac{2\pi}{T_{\Pi}} x$, T_{Π} – пространственный период волны.

Знак плюс перед символом a – для левобегущего поля (при возрастании времени максимум волны смещается влево по оси абсцисс), знак минус – для правобегущего.

Обмотки ЭМТ и АГ размещены таким образом, что при питании их трехфазной симметричной системой токов они образуют вращающиеся магнитные поля в зазоре электрической машины, имеющие встречные направления вращения.

Примем за положительное направление вращения вращение по часовой стрелке, примем также, что ротор вращается в положительном направлении.

Чередование фазных обмоток ЭМТ происходит в положительном направлении, поэтому волна магнитной индукции фазы А будет опережать волну магнитной индукции фазы В, волна фазы В – волну фазы С.

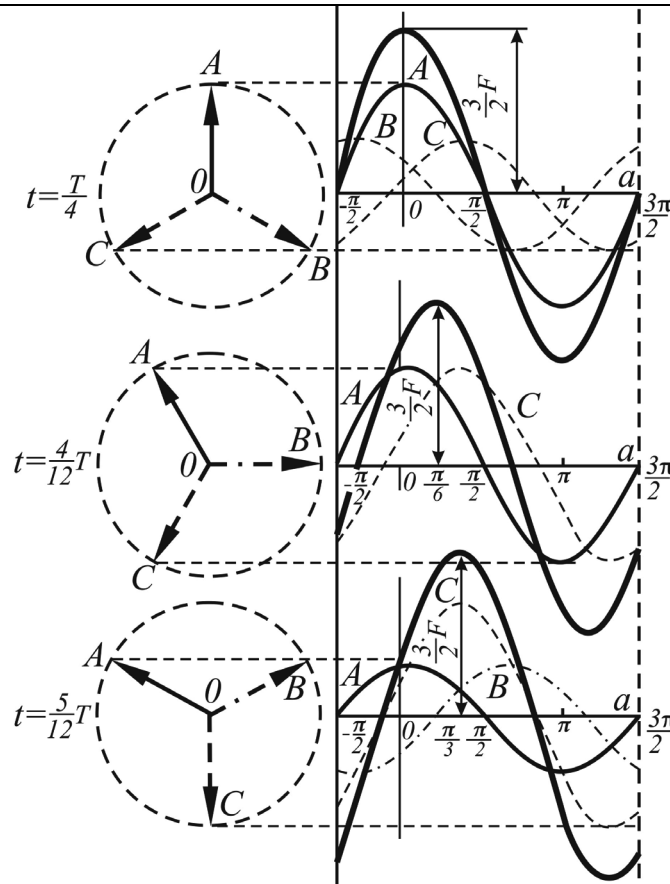


Рис. 1. Сложение трех пульсирующих полей

При таком расположении обмоток ЭМТ выражения для нормальных к поверхности ротора составляющих магнитной индукции обмотки выглядят следующим образом:

$$B(\alpha)_A = B_A \sin p_2 \alpha, \quad B(\alpha)_B = B_B \sin \left(p_2 \alpha - \frac{2\pi}{3} \right), \quad B(\alpha)_C = B_C \sin \left(p_2 \alpha - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Фазовые обмотки ЭМТ питаются синусоидальными напряжениями, сдвинутыми по фазе на треть периода, и при соответствующем выборе момента времени амплитуды B_A , B_B , B_C можно выразить через синусоидальные функции:

$$B(t)_A = B_0 \sin \omega t, \quad B(t)_B = B_0 \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right), \quad B(t)_C = B_0 \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right).$$

Результирующую магнитную индукцию ЭМТ на поверхности ротора найдем путем сложения магнитных индукций обмоток:

$$B(t, \alpha)_2 = B_0 \left(\sin p_2 \alpha \sin \omega t + \sin \left(p_2 \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(p_2 \alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) \right).$$

После проведения тригонометрических преобразований получим выражение для бегущей волны магнитной индукции, формируемой ЭМТ:

$$B(t, \alpha)_2 = -\frac{3}{2} B_0 \cos(p_2 \alpha + \omega t). \quad (2)$$

Чередование фазных обмоток АГ происходит в отрицательном направлении, поэтому волна магнитной индукции фазы С будет опережать волну магнитной индукции фазы В, волна фазы В – волну фазы А.

При таком расположении обмоток АГ выражения для нормальных к поверхности ротора составляющих магнитной индукции обмотки выглядят следующим образом:

$$B(\alpha)_A = B_A \sin p_3 \alpha, \quad B(\alpha)_B = B_B \sin\left(p_3 \alpha + \frac{2\pi}{3}\right), \quad B(\alpha)_C = B_C \sin\left(p_3 \alpha + \frac{4\pi}{3}\right).$$

Фазовые обмотки АГ, также как и обмотки ЭМТ, питаются синусоидальными напряжениями, сдвинутыми по фазе на треть периода:

$$B(t)_A = B_0 \sin \omega t, \quad B(t)_B = B_0 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad B(t)_C = B_0 \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right).$$

Результирующую магнитную индукцию АГ на поверхности ротора найдем путем сложения магнитных индукций обмоток:

$$B(t, \alpha)_3 = B_0 \left(\sin p_3 \alpha \sin \omega t + \sin\left(p_3 \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(p_3 \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \right).$$

После проведения тригонометрических преобразований получим выражение для бегущей волны магнитной индукции, формируемой ЭМТ:

$$B(t, \alpha)_3 = \frac{3}{2} B_0 \cos(p_3 \alpha - \omega t). \quad (3)$$

Обмотки ЭМТ и АГ возбуждаются от АВ токами частоты ω_B , поэтому выражения (2) и (3) с учетом выражения (1) примут вид:

$$B(t, \alpha)_2 = -\frac{3}{2} B_0 \cos(p_2 \alpha + [\omega_1 + \omega' p_1] t), \quad (4)$$

$$B(t, \alpha)_3 = \frac{3}{2} B_0 \cos(p_3 \alpha - [\omega_1 + \omega' p_1] t). \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) определяют распределение волн магнитной индукции относительно ротора.

Чтобы определить выражения для волн магнитной индукции относительно статора, найдем угловые скорости для каждой из бегущих волн. Для этого зафиксируем фазу волны:

$$B(t, \alpha)_2 = const, \quad B(t, \alpha)_3 = const,$$

откуда следует:

$$p_2 \alpha_2 + (\omega_1 + \omega' p_1) t = const,$$

$$p_3 \alpha_3 - (\omega_1 + \omega' p_1) t = const.$$

При дифференцировании получаем:

$$p_2 d\alpha_2 + (\omega_1 + \omega' p_1) dt = 0, \quad (6)$$

$$p_3 d\alpha_3 - (\omega_1 + \omega' p_1) dt = 0. \quad (7)$$

Преобразуя (6) и (7), найдем выражения для угловых скоростей ЭМТ и АГ соответственно:

$$\frac{d\alpha_2}{dt} = -\frac{\omega_1 + \omega' p_1}{p_2}, \quad \frac{d\alpha_3}{dt} = \frac{\omega_1 + \omega' p_1}{p_3}.$$

При вращении ротора в положительном направлении с угловой скоростью ω' выражения для угловых скоростей волн магнитной индукции относительно статора будут следующими:

$$\frac{d\alpha_{2C}}{dt} = \omega' - \frac{\omega_1 + \omega' p_1}{p_2} = \frac{\omega'(p_2 - p_1) - \omega_1}{p_2}, \quad (8)$$

$$\frac{d\alpha_{3C}}{dt} = \omega' + \frac{\omega_1 + \omega' p_1}{p_3} = \frac{\omega'(p_3 + p_1) + \omega_1}{p_3}. \quad (9)$$

После преобразований (8) и (9) и подстановки их в (4) и (5) найдем выражения для изменения волн магнитной индукции относительно статора:

$$B(t, \alpha)_2 = -\frac{3}{2} B_0 \cos(p_2 \alpha + [\omega_1 - \omega'(p_2 - p_1)]t), \quad (10)$$

$$B(t, \alpha)_3 = \frac{3}{2} B_0 \cos(p_3 \alpha - [\omega_1 + \omega'(p_3 + p_1)]t). \quad (11)$$

Пример распределения каждой составляющей поля и результирующего поля в зазоре машины представлен на рис. 2.

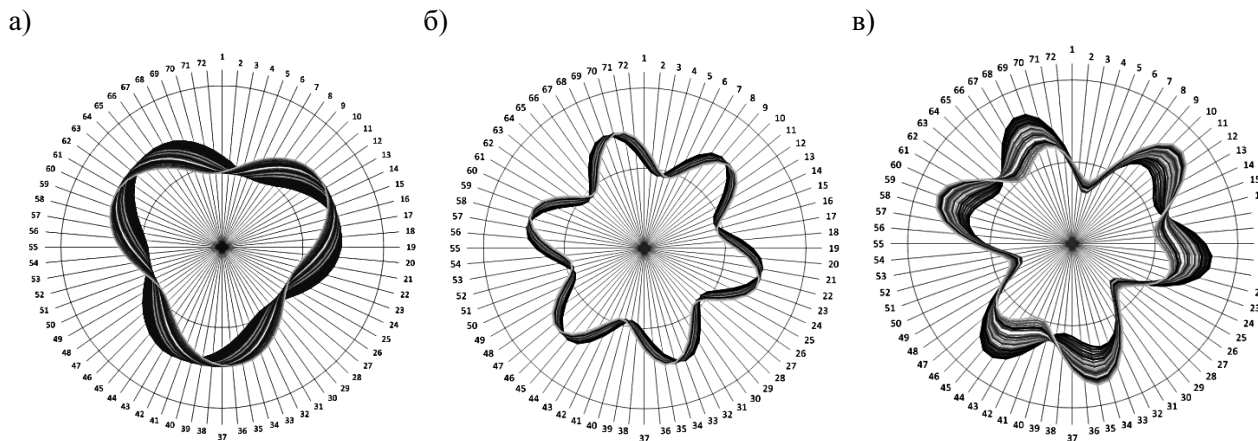


Рис. 2. Магнитные поля зазора электрической машины с совмещенным магнитопроводом: а – ЭМТ с $p_2 = 3$; б – АГ с $p_3 = 6$; в – суммарного магнитного поля в зазоре

Расположим на статоре совмещенной электрической машины симметричную m -фазную обмотку с количеством пар полюсов $2p_4$ с чередованием фаз в положительном направлении.

Стороны каждой катушки при этом расположены в точках с угловым расстоянием:

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi}{2p_4} \beta, \quad (12)$$

где β – коэффициент укорочения обмотки.

Начала и окончания витков с учетом (12) расположены соответственно в точках с угловыми координатами:

$$\alpha_{1k} = \frac{2\pi(k-1)}{2p_4 m} + \frac{2\pi(r-1)}{p_4} = \frac{\pi}{p_4} \left(\frac{(k-1)}{m} + 2(r-1) \right), \quad (13)$$

$$\alpha_{2k} = \frac{2\pi(k-1)}{2p_4 m} + \frac{2\pi(r-1)}{p_4} + \Delta\alpha = \frac{\pi}{p_4} \left(\frac{(k-1)}{m} + 2(r-1) + \beta \right), \quad (14)$$

где $k = 1..m$ – условный номер фазы; $r = 1..p_4$ – условный номер полюса в фазе.

В витках фазы будет индуцироваться электродвижущая сила, которая будет равна:

$$E = -wl \sum_{r=1}^{p_4} \frac{d}{dt} \int_{\alpha_{1k}}^{\alpha_{2k}} (b_2 + b_3) d\alpha, \quad (15)$$

где w – количество витков в катушке; l – длина магнитопровода статора.

С учетом того, что:

$$\frac{d}{dt} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} q(\alpha) d\alpha = q(\alpha_2) \frac{d\alpha_2}{dt} - q(\alpha_1) \frac{d\alpha_1}{dt},$$

а также (10), (11), (13) и (14) – запишем (15) для фазы А:

$$E_A = -\frac{3}{2} w l B_0 \sum_{r=1}^{p_4} \left[\begin{aligned} & [\omega_1 + \omega'(p_3 + p_1)] \cdot \left(\cos(p_3 \alpha_{11} - [\omega_1 + \omega'(p_3 + p_1)]t) - \right. \\ & \left. - \cos(p_3 \alpha_{21} - [\omega_1 + \omega'(p_3 + p_1)]t) \right) - \\ & - [\omega_1 - \omega'(p_2 - p_1)] \cdot \left(\cos(p_2 \alpha_{11} + [\omega_1 - \omega'(p_2 - p_1)]t) + \right. \\ & \left. + \cos(p_2 \alpha_{21} + [\omega_1 - \omega'(p_2 - p_1)]t) \right) \end{aligned} \right]. \quad (16)$$

Для удобства введем новые переменные:

$$\omega_3 = \omega_1 + \omega'(p_3 + p_1), \quad \omega_2 = \omega_1 - \omega'(p_2 - p_1), \quad \alpha_{xk} = \alpha_{1k} + \frac{\pi\beta}{2p_4}, \quad (17)$$

тогда

$$\alpha_{1k} = \alpha_{xk} - \frac{\pi\beta}{2p_4}, \quad \alpha_{2k} = \alpha_{xk} + \frac{\pi\beta}{2p_4}, \quad (18)$$

После преобразования формулы (16) с учетом (18) и (19) выражение для ЭДС фазы А:

$$E_A = -\frac{3}{2} w l B_0 \sum_{r=1}^{p_4} \left[\begin{aligned} & \omega_3 \left\{ \cos\left(\langle p_3 \alpha_{x1} - \omega_3 t \rangle - \frac{\pi\beta p_3}{2p_4}\right) - \cos\left(\langle p_3 \alpha_{x1} - \omega_3 t \rangle + \frac{\pi\beta p_3}{2p_4}\right) \right\} + \\ & + \omega_2 \left\{ \cos\left(\langle p_2 \alpha_{x1} + \omega_2 t \rangle + \frac{\pi\beta p_2}{2p_4}\right) - \cos\left(\langle p_2 \alpha_{x1} + \omega_2 t \rangle - \frac{\pi\beta p_2}{2p_4}\right) \right\}. \end{aligned} \right] \quad (19)$$

Применив тригонометрические преобразования к выражению (20), получим окончательное выражение для фазы А:

$$E_A = -\frac{3}{2} w l B_0 \sum_{r=1}^{p_4} \left[\begin{aligned} & \omega_3 \left\{ 2 \sin\left(\frac{\pi\beta p_3}{2p_4}\right) \sin(p_3 \alpha_{x1} - \omega_3 t) \right\} - \\ & - \omega_2 \left\{ 2 \sin\left(\frac{\pi\beta p_2}{2p_4}\right) \sin(p_2 \alpha_{x1} + \omega_2 t) \right\}. \end{aligned} \right] \quad (20)$$

Выражения для ЭДС фаз В и С соответственно:

$$E_B = -\frac{3}{2} w l B_0 \sum_{r=1}^{p_4} \left[\begin{aligned} & \omega_3 \left\{ 2 \sin\left(\frac{\pi\beta p_3}{2p_4}\right) \sin(p_3 \alpha_{x2} - \omega_3 t) \right\} - \\ & - \omega_2 \left\{ 2 \sin\left(\frac{\pi\beta p_2}{2p_4}\right) \sin(p_2 \alpha_{x2} + \omega_2 t) \right\}. \end{aligned} \right] \quad (21)$$

$$E_C = -\frac{3}{2} w l B_0 \sum_{r=1}^{p_4} \left[\begin{aligned} & \omega_3 \left\{ 2 \sin\left(\frac{\pi\beta p_3}{2p_4}\right) \sin(p_3 \alpha_{x3} - \omega_3 t) \right\} - \\ & - \omega_2 \left\{ 2 \sin\left(\frac{\pi\beta p_2}{2p_4}\right) \sin(p_2 \alpha_{x3} + \omega_2 t) \right\}. \end{aligned} \right] \quad (22)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин, В. М. Автономный источник с электромашинным формированием кривой выходного напряжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. М. Кузьмин. – Томск: Томский политехнический институт, 1981. – 20 с.
2. Петухов, А. М. Особенности формирования поля воздушного зазора и ЭДС фаз совмещенного электромагнитного генератора / А. М. Петухов, В. М. Кузьмин, И. Н. Дубровский // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – № III-1(7). – С. 13-20.



Голоколос Д. А., Гринфельд Г. М.
D. A. Golokolos, G. M. Grinfeld

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

ESTIMATION OF SHIELDING ELEMENTS' INFLUENCES ON THE PROPERTIES OF ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

Голоколос Дмитрий Анатольевич – аспирант кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Интернациональный, 59-31; 8-(914)-212-34-72. E-mail: dag@land.ru

Mr. Dmitry A. Golokolos – PhD candidate, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681024, Komsomolsk-on-Amur, Internatsionalny av. 59 – 31; 8 (914) 2123472. E-mail: dag@land.ru.

Гринфельд Григорий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Пионерская, 61-20; 8-(914)-174-39-14. E-mail: grinfelds2002@mail.ru

Mr. Grigory M. Grinfeld – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of the Electric Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681018, Komsomolsk-on-Amur, Pionerskaya str. 61–20; 8(914)1743914. E-mail:grinfelds2002@mail.ru.

Аннотация. Применение специального энергетического оборудования в промышленности, медицине, на транспорте и других объектах, характеризующихся сложными условиями эксплуатации, требует не только совершенствования методов проектирования и конструктивной модернизации, но и более строгого учета особенностей таких устройств, в частности, при реализации систем управления ими. В данной статье рассмотрены вопросы определения параметров экранирующих элементов и проведен анализ их влияния на эксплуатационные характеристики электромеханических преобразователей специального назначения. Целью исследования является оценка влияния и разработка рекомендаций по выбору размерных соотношений экранирующих элементов и повышение эффективности электротехнических комплексов, создаваемых на основе герметичных электромеханических преобразователей.

Summary. The use of specialized energy equipment in industry, medicine, transport and in other areas characterized by severe operating conditions, requires not only the improvement of methods for design and modernization, but also more attention to the properties of such machinery, particularly for the purposes of designing control systems for it. The paper explores such problems as determination of shielding elements' parameters; their influence on the operational performance of electromechanical converters is analyzed. The purpose of this study is estimation of shielding elements' influences upon and the development of recommendations for the choice of dimensional ratio for shielding elements; and the increase of operating efficiency of electric engineering installations based on hermetically sealed electromechanical converters.

Ключевые слова: специальные электромеханические преобразователи, энергоэффективность, экранирующий элемент, математическое моделирование электромагнитных процессов.

Key words: specialized electromechanical converter, energy efficiency, electromagnetic shielding element, mathematical modeling of electromagnetic processes.

УДК 621.313

Введение

В настоящее время в целом ряде прикладных областей большое внимание уделяется специальным электромеханическим преобразователям герметичного исполнения. Характерным примером такого применения являются разработки фирмы Siemens, использующие электропривода в герметичной оболочке без маслосистемы для компрессоров мощностью до 20 МВт, предназначенных для транспортировки сопутствующих газов с большой глубины [4]. При этом определяющим экономическую эффективность фактором является надежная работа энергетического оборудования при требуемой наработке не менее 20 тыс. ч. В данном случае герметичные экранированные электродвигатели являются практически единственным вариантом приводного устройства благодаря простоте и надежности конструкции.

Использование герметичных электромеханических преобразователей весьма перспективно в качестве приводов не только компрессоров, центрифуг, мешалок, насосов, но и в других аппаратах, где требуется, например, полностью исключить утечку реагирующих и загрязняющих компонентов в окружающую среду, при работе с огнеопасными средами, при высоких и низких давлениях и температурах.

Конструкция герметичных электродвигателей

Типичная конструкция герметичных электродвигателей рассмотрена в работах [4; 8].

Основными конструктивными отличиями герметичных электромеханических преобразователей от электродвигателей общего назначения являются следующие:

1. Наличие в зазоре между расточкой статора и ротора тонкостенного экрана из немагнитной стали, имеющей относительно высокое удельное электрическое сопротивление. При этом на наружную поверхность экрана может накладываться слой изоляции толщиной примерно 0,2 мм – вплоть до места замыкания (приваривания) концов экрана на массивные детали торцевой зоны статора.

2. Ротор вращается в рабочей жидкости, циркулирующей через гидравлический зазор между расточкой статора и ротора, необходимый для установки экрана и прокачки рабочей жидкости.

3. Относительно большой зазор между расточкой статора и ротора, необходимый для установки экрана и прокачки рабочей жидкости.

4. Закрытые и полужакрытые пазы статора. При этом выбирается такая форма клиньев, при которой исключалась бы, как недопустимая, деформация экрана статора от внутреннего давления.

5. Основными источниками тепловых потерь являются электропроводящая экранирующая гильза и обмотка статора.

Следует отметить, что если для расчета электромагнитных параметров общепромышленных асинхронных двигателей существуют апробированные методики проектирования [4; 5], то для экранированных машин они до сих пор являются предметом теоретических и экспериментальных исследований, что также определяет актуальность разработки и исследования этих устройств.

Особенности расчета параметров экранирующего элемента

При расчете и исследовании герметичных электромеханических преобразователей может быть использовано несколько подходов, ориентированных на различное представление о физических процессах в исследуемых устройствах. Аналитическое исследование экранированных преобразователей с учетом их конструктивных особенностей, закономерностей распределения токов, возбуждающих поле, и физических свойств отдельных сред достаточно сложная задача, требующая при решении ряда существенных допущений даже для получения инженерной методики расчета [7].

Все теоретические исследования асинхронных двигателей с экраном или полым ротором связаны с гипотезами о распределении вихревого тока в роторе или с решением задач о распределении поля и вихревого тока.

В работе [8] расчеты проводятся с допущением, что по длине пакета статора токи текут параллельно оси ротора, и весь ток замыкается в выступающих за длину статора краях ротора как в короткозамкнутых кольцах.

Б. Л. Фуллер и П. Н. Трикей [7] представляли ротор сложной конфигурации в виде ряда частей и определяли сопротивление ротора по эквивалентной схеме замещения из условия минимального сопротивления пути для вихревого тока. Эти гипотезы не обеспечивали достаточной точности при расчете сопротивления ротора r_R , особенно большие расхождения получались при малой длине выступающих за пределы статора краев ротора.

Впервые распределение вихревых токов аналитическим путем было найдено И. С. Бруком для сплошного ферромагнитного ротора [2] для плоской магнитной системы и стоячей волны тока статора. В 1946 г. эта задача применительно к двигателям с немагнитным полым ротором без учета влияния краев ротора была решена в работе [8] (см. рис. 1).

Система разбивалась на три области: I и III – области воздушных зазоров δ_1 и δ_2 ; II – область, занятая током ротора. Для обобщения поля в токовой и бестоковой областях вводился векторный магнитный потенциал. Записывались уравнения Максвелла для каждой области, а затем уравнения Лапласа для бестоковых областей и Пуассона – для области II, занятой вихревыми токами.

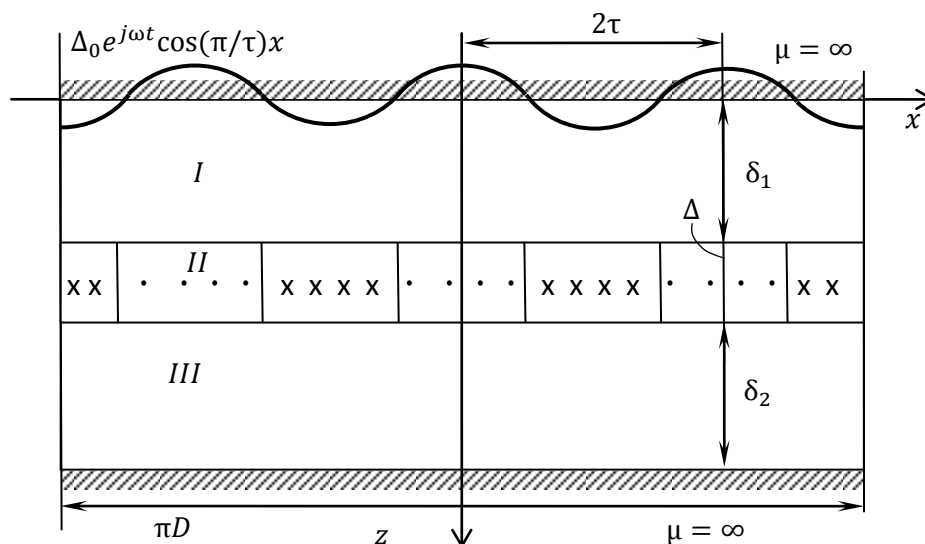


Рис. 1. Расчетная модель И. С. Брука

Из решения этих уравнений определялся векторный потенциал для каждой области, а затем их поля и плотность вихревого тока. Активные потери в роторе определялись как действительная часть вектора Пойтинга. От выражений, полученных для стоячей волны, был сделан переход к бегущей волне – вращающемуся полю. По потерям и приведенному току в роторе определялось его активное сопротивление r_R , приведенное к числу фаз и витков обмотки статора.

Логическим продолжением и развитием этих исследований явилась работа И. А. Вевюрко, в которой для ротора ограниченной длины плотность вихревого тока по толщине цилиндра и радиальная составляющая напряженности магнитного поля принимаются постоянными [3].

Однако аналитические методики, полученные при существенных допущениях и упрощениях физической картины электромагнитных взаимодействий в расчетных областях, дают существенное расхождение теоретических результатов с экспериментальными данными при различных конструктивных особенностях и режимах работы двигателя.

Постановка полевой задачи

Для аналитического определения параметров тонкостенного экранирующего элемента ($\Delta \leq 0,5$ мм) может быть использован подход, сводящийся к решению полевой задачи в постановке С. В. Поклонова [8]. С учетом отмеченных конструктивных особенностей, при выводе основных соотношений для потерь в замкнутом экране статора принимаются следующие допущения:

1. Магнитное поле, связанное с экраном, ограничено расчетной длиной воздушного зазора.
2. Магнитное поле равномерно по длине зазора и имеет только нормальную составляющую, неизменную по всей толщине экрана и изменяющуюся гармонически по окружности воздушного зазора.
3. Индукция магнитного поля в лобовых частях экрана равна нулю.
4. Магнитная проницаемость экрана равна магнитной проницаемости воздуха.
5. Существует только одна гармоническая всех известных и определяемых величин.
6. Индуктивное сопротивление экрана пренебрежимо мало.
7. Экран не образует во всей длине статора (до места замыкания) токоведущих контуров с массивными деталями статора.

На рис. 2 изображена схема герметичного электродвигателя [1] и цилиндрический экран, разрезанный по образующей и развернутый. Там же выделены активная часть экрана, равная длине активной части статора l_t , и лобовые части экрана длиной l_b .

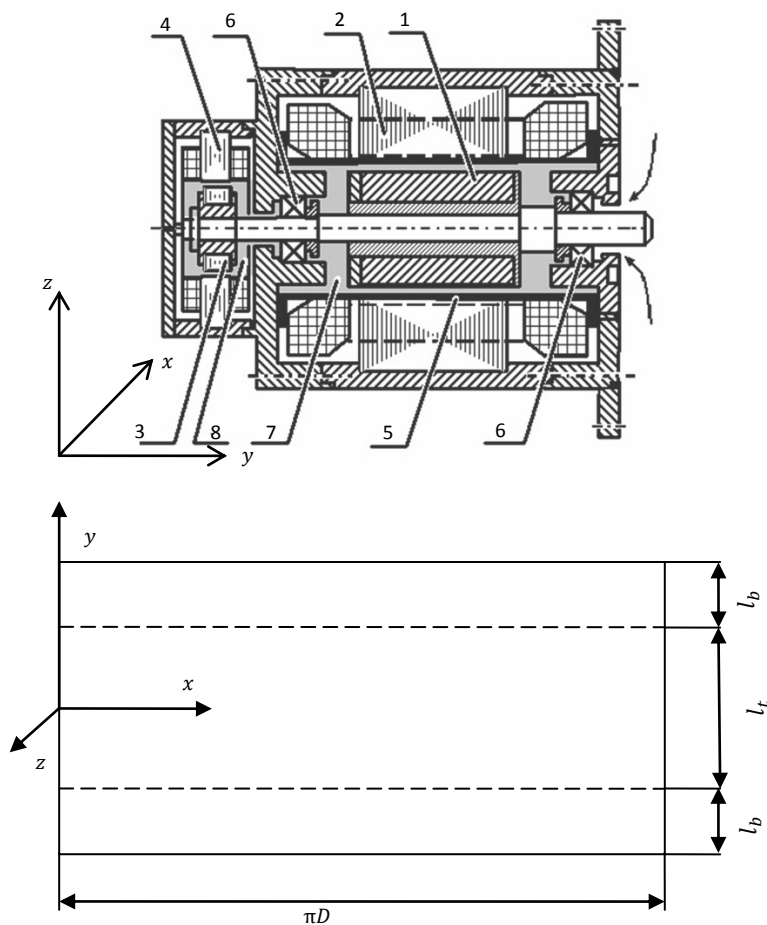


Рис. 2. Схема герметичного электродвигателя и развертка экрана статора:
 1 – ротор двигателя; 2 – статор двигателя; 3 – ротор датчика положения; 4 – статор датчика положения; 5 – экран; 6 – подшипник качения; 7 – полость вокруг ротора двигателя, заполненная теплоносителем; 8 – полость вокруг ротора положения, заполненная теплоносителем



Так как экран симметричен относительно оси x , то потери, выделяемые в верхней и нижней частях экрана, будут одинаковыми. Поэтому решение задачи приводится только для верхней половины экрана.

Распределение напряженности электрического поля в частях экрана описываются следующими уравнениями, вытекающими из общих уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} E = \frac{dB}{dt} \\ \operatorname{div} E\gamma = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Учитывая второе допущение, система (1) преобразуется в

$$\begin{cases} \nabla^2 E_{lx} = 0 \\ \nabla^2 E_{ly} = -B_\delta \omega \frac{\pi}{\tau} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) справедлива для активной части экрана. Для лобовых частей экрана согласно третьему допущению справедливы следующие уравнения:

$$\begin{cases} \nabla^2 E_{bx} = 0 \\ \nabla^2 E_{by} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Считая распределение тока в экране плоским, составляющие напряженности электрического поля и плотности тока по оси z принимаем равными нулю. Согласно принятым допущениям индукция магнитного поля изменяется синусоидально. Следовательно, плотность тока тоже будет изменяться синусоидально во времени и по оси x .

Совместное решение систем дифференциальных уравнений (2) и (3), пригодное для разомкнутых и замкнутых экранов, приведено в работе [6], с помощью метода Фурье получены следующие выражения для составляющих напряженности E :

$$\begin{cases} E_{lx} = (C_1 e^{\frac{\pi}{\tau} y} + C_2 e^{-\frac{\pi}{\tau} y}) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} \\ E_{ly} = (C_3 e^{\frac{\pi}{\tau} y} + C_4 e^{-\frac{\pi}{\tau} y} + B_\delta \omega \frac{\pi}{\tau}) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} \\ E_{bx} = (C_5 e^{\frac{\pi}{\tau} y} + C_6 e^{-\frac{\pi}{\tau} y}) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} \\ E_{by} = (C_7 e^{\frac{\pi}{\tau} y} + C_8 e^{-\frac{\pi}{\tau} y}) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)} \end{cases} \quad (4)$$

Для определения постоянных интегрирования в работе [6] приняты следующие граничные условия, справедливые для разомкнутого и замкнутого экрана:

1. симметричность экрана статора;
2. равенство нормальных составляющих плотности тока на границе раздела активной и лобовых частей экрана;
3. равенство тангенциальных составляющих напряженности электрического поля;
4. непрерывность тока для активной и лобовых частей экрана.

Из приведенных граничных условий получены восемь уравнений связи между постоянными интегрирования:

$$\begin{cases} C_1 = C_2 \\ C_3 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} + C_4 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} + B_\delta \omega \frac{\pi}{\tau} = C_7 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} + C_8 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} \\ C_1 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} + C_2 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} = C_5 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} + C_6 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} \\ C_1 + C_2 = -j(C_3 - C_4) \\ C_1 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} + C_2 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} = -j(C_3 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} - C_4 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}}) \\ C_5 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} + C_6 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}} = -j(C_7 e^{\frac{\pi\lambda}{2}} - C_8 e^{-\frac{\pi\lambda}{2}}) \\ C_5 e^{\frac{\pi(\lambda+\beta)}{2}} + C_6 e^{-\frac{\pi(\lambda+\beta)}{2}} = -j \left(C_7 e^{\frac{\pi(\lambda+\beta)}{2}} - C_8 e^{-\frac{\pi(\lambda+\beta)}{2}} \right) \\ C_5 e^{\frac{\pi(\lambda+\beta)}{2}} + C_6 e^{-\frac{\pi(\lambda+\beta)}{2}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

где $\lambda = \frac{l}{\tau}$; $\beta = \frac{2l_b}{\tau}$.

Составляющая напряженности электрического поля определяется из систем уравнений (4) и (5)

$$\dot{E}_{ly} = \left[1 - \frac{ch \frac{\pi}{\tau} y}{ch \frac{\pi \lambda}{2} + sh \frac{\pi \lambda}{2} cth \frac{\pi \beta}{2}} \right] B_{\delta} \omega \frac{\tau}{\pi} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}.$$

Плотность тока и силу, действующую на элемент тока экрана, получим из закона Ома в дифференциальной форме и закона Ампера

$$J = E_{ly} \gamma, \\ dF = Re B_z E_{ly} \gamma \Delta dx dy.$$

Произведение силы на скорость магнитного поля относительно экрана ($v = \omega t / \pi = 2\pi f \tau / \pi$) позволяет получить потери в замкнутом экране статора

$$P_{\Sigma c} = Re 2 \int_0^{l_t/2} \int_0^{\pi D} B_z E_{ly} \gamma v \Delta dx dy = 4p B_{\delta}^2 \tau^3 f^2 l_t \gamma \Delta k_p, \quad (6)$$

где

$$k_p = 1 - \frac{1}{\frac{\pi \lambda}{2} \left(cth \frac{\pi \lambda}{2} + cth \frac{\pi \beta}{2} \right)}, \quad (7)$$

k_p – коэффициент краевого эффекта, характеризующий отношение потерь в замкнутом экране к потерям в таком экране, у которого лобовые части были бы сверхпроводящими.

Из уравнения (7) можно определить длину одностороннего вылета замкнутого экрана $l_b = 0,5\tau$, при которой коэффициент k_p , а следовательно, и потери в экране будут минимальными. При дальнейшем увеличении длины вылета потери в экране практически не изменяются.

Из этого же уравнения также следует, что коэффициент k_p будет максимальным, т.е. равным единице в том случае, если экран замкнут в непосредственной близости от сердечника статора ($l_b = 0$).

Выражения (6) и (7) использованы для расчета активных потерь в экранирующем элементе для двигателя мощностью 4 кВт при длине одностороннего вылета экрана $l_b = 0,5 \cdot \tau = 50$ мм, число пар полюсов обмотки статора равно двум, относительная длина активной части экрана $\lambda = l_t / \tau$ составляет $150/100 = 1,5$. При расчете принимались следующие материалы экрана:

1. нержавеющая нихромовая сталь X20H80 (ГОСТ 12766.5-90) с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 1,15 \cdot 10^{-6}$ Ом · м;
2. бронза БрАЖН (ГОСТ 613-79), удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,19 \cdot 10^{-6}$ Ом · м;
3. железо (ГОСТ 13610-79), удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,098 \cdot 10^{-6}$ Ом · м.

Удельные потери $P/P_n \cdot 100$ % в экране статора рассчитаны для магнитной индукции в зазоре $B_{\delta} = 0,2 \dots 1,2$ Тл и толщины экрана $\Delta = 0,5 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ мм. Результаты расчета представлены на рис. 3 – 5.

Результаты расчета и их анализ

Как видно из графиков (см. рис. 3 – 5), потери обратно пропорциональны удельному электрическому сопротивлению материала экрана, который оказывает существенное влияние на их величину. При этом величина удельных потерь составляет 6 – 8 % при экране из нержавеющей стали, до 70 – 80 % – при экране из железа, что ухудшает эксплуатационные характеристики двигателя. При одинаковых значениях индукции и толщины экрана, потери для экрана из нержавеющей стали и железа, т.е. при изменении $\rho = 1,15 \cdot 10^{-6}$ Ом м... $0,098 \cdot 10^{-6}$ Ом м, отличаются почти на порядок.

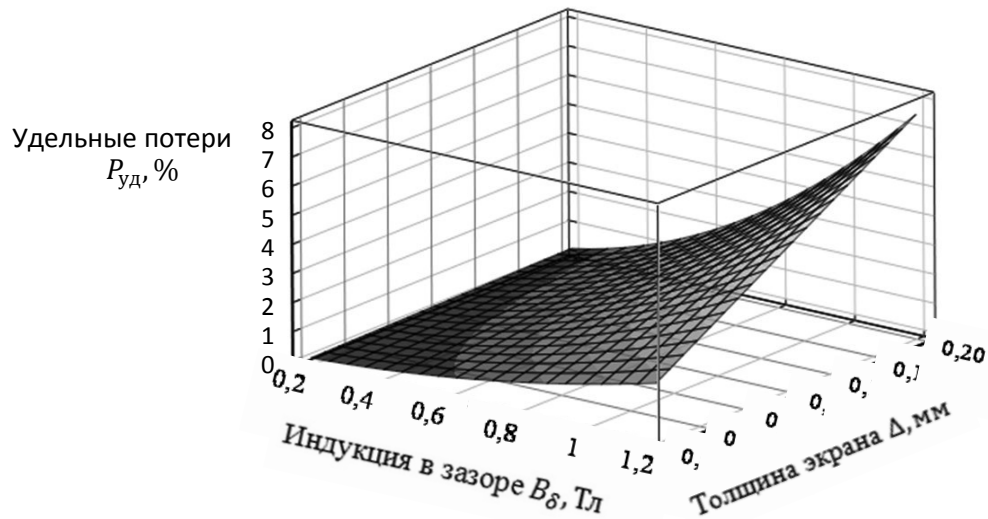


Рис. 3. Удельные электрические потери в экране из нержавеющей нихромовой стали

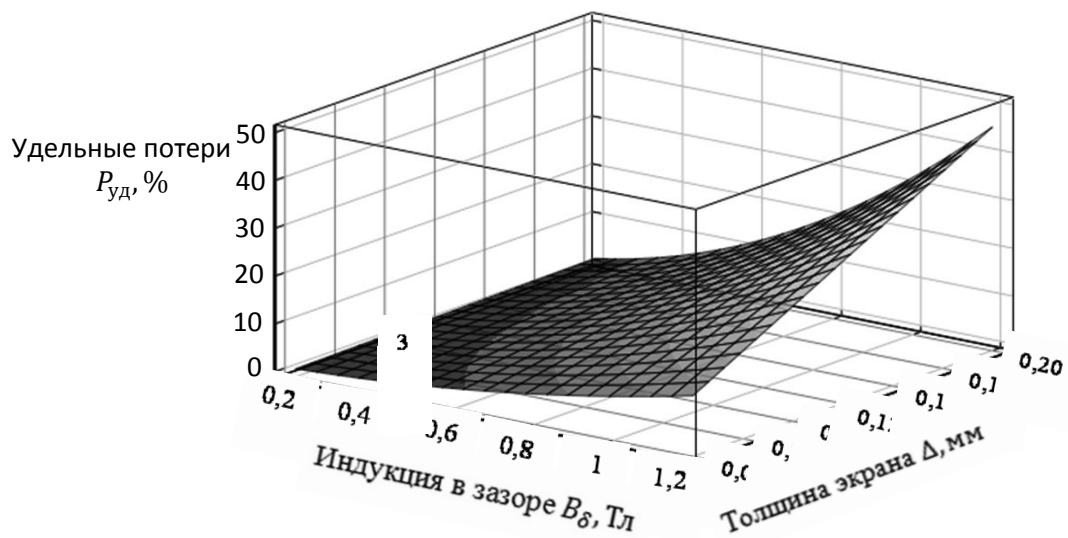


Рис. 4. Удельные электрические потери в экране из бронзы

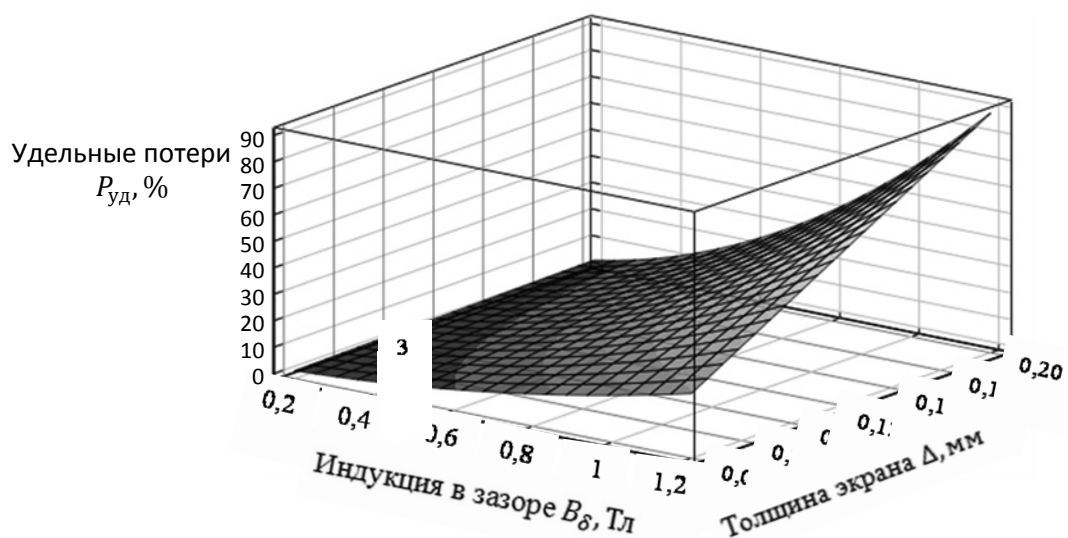


Рис. 5. Удельные электрические потери в экране из железа

Значительно меньшее влияние на величину потерь в рассмотренном диапазоне оказывают индукция в воздушном зазоре B_δ и толщина экрана Δ . И если уменьшение индукции в воздушном зазоре не целесообразно, так как она определяет передаваемую от статора к ротору электромагнитную мощность, то толщина экрана должна выбираться наименьшей, но при этом должна обеспечиваться необходимая механическая прочность.

Из выражения (7) также следует, что уменьшение полюсного деления τ также уменьшает потери в экране. Поэтому в качестве рекомендации может быть рассмотрена возможность изготовления двигателей с большим отношением длины активной части к полюсному делению λ , хотя при этом необходимо учитывать, что изменение длины влияет как на условия теплоотдачи [9], так и на удельные нагрузки, воспринимаемые валом ротора.

Выводы

1. Анализ существующих подходов к расчету асинхронных двигателей с немагнитными экранирующими элементами выявил отсутствие адаптированной методики проектирования капсулированных электродвигателей с учетом конструктивных особенностей экранирующих элементов.

2. Оценка влияния параметров экранирующих элементов с использованием полученных выражений показывает, что экран целесообразно выполнять из немагнитного материала с относительно высоким удельным электрическим сопротивлением, обеспечивающим уменьшение индуцированных вихревых токов, например из нержавеющей никромовых сталей типа ХН70 и ХН78Т.

3. Потери в экране пропорциональны величине полюсного деления τ^3 . Однако уменьшение полюсного деления приводит к увеличению отношения длины статора к величине полюсного деления λ , а при большом значении отношения λ двигатель должен изготавливаться с массивным ротором. Сердечник ротора при этом выполняется как одно целое с валом для обеспечения жесткости вала по критической частоте вращения.

4. Относительная величина потерь в экране может достигать значений, соизмеримых с номинальной мощностью, что указывает на необходимость дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку и уточнение методик расчета элементов капсулированных электродвигателей.

5. При использовании герметичных электромеханических преобразователей в автоматизированных электротехнических комплексах система управления электродвигателем должна синтезироваться с учетом параметров экранирующих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобков, А. В. Центробежные насосы систем терморегулирования космических аппаратов / А. В. Бобков. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 217 с.
2. Брук, И. С. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором / И. С. Брук // Вестник экспериментальной и теоретической электротехники. – 1929. – № 5. – С. 175-193.
3. Вевюрко, И. А. О расчете асинхронной машины с полым ротором методом симметричных составляющих / И. А. Вевюрко // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 5. – С. 28-32.
4. Дурыманов, В. В. На суше и под водой: капсулированный компрессорный агрегат STC-ECO компании Siemens / В. В. Дурыманов [и др.] // Турбины и дизели. – 2010. – № 2. – С. 10-15.
5. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. – М.: Высшая шк., 2002. – 757 с.
6. Куцевалов, В. М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / В. М. Куцевалов. – М.: Энергия, 1966. – 302 с.
7. Лопухина, Е. М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики: учеб. пособие / Е. М. Лопухина. – М.: Высшая шк., 1988. – 328 с.
8. Поклонов, С. В. Асинхронные двигатели герметичных электронасосов / С. В. Поклонов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1987. – 64 с.
9. Приходченко, О. В. Математическое моделирование и анализ электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических теплогенерирующих преобразователях / О. В. Приходченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2011. – № 3-1(7). – С. 27-37.

Амосов О. С., Елисеев М. Е., Тихонов А. С.
O. S. Amosov, M. E. Eliseev, A. S. Tikhonov

**ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ, ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ
РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ УНИВЕРСИТЕТА**

**DEVELOPMENT, DESIGN, IMPLEMENTATION AND FURTHER PERSPECTIVES
OF A UNIVERSITY-WIDE INTELLIGENT CONTROLLED ENERGY-SAVING LIGHTING
SYSTEM**

Амосов Олег Семенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: osa18@yandex.ru

Mr. Oleg S. Amosov – Doctor of Engineering, Head of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa18@yandex.ru

Елисеев Максим Евгеньевич – аспирант, начальник отдела инноваций Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: eliseevme@gmail.com

Mr. Maksim Ye. Eliseev – PhD Candidate, Head of Innovations Division, Amur Humanitarian and Pedagogical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: eliseevme@gmail.com

Тихонов Александр Сергеевич – аспирант, ведущий программист отдела инноваций Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tikhonov.kms@gmail.com

Mr. Alexandr S. Tikhonov – PhD Candidate, Chief Software Specialist, Innovations Division, Amur Humanitarian and Pedagogical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tikhonov.kms@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена решению задачи снижения энергозатрат при реализации искусственного освещения в организации. Описан опыт внедрения в университете управляемых энергосберегающих систем освещения различной конфигурации. Предложена интеллектуальная управляемая энергосберегающая система освещения.

Summary. This paper deals with the problem of reducing energy losses linked to an electric lighting system installed in an organization. The authors describe their experience of implementation of university-wide controlled energy-saving lighting systems of different configuration. An intellectual energy-saving lighting system is proposed.

Ключевые слова: Энергосбережение, система управления освещением, интеллектуальный контроллер.

Key words: Energy saving, lighting control system, intelligent controller.

УДК 004.89

Введение

Статья написана по результатам исследования, разработки, внедрения и эксплуатации управляемых энергосберегающих систем освещения (УЭСО) для первого корпуса ФГБОУ ВПО «АмГППУ». Работы выполнялись авторами в течение 2010 – 2012 гг.

Актуальность энергосбережения при освещении

Необходимость перехода к УЭСО связана с задачей повышения эффективности систем освещения (СО). Эффективность СО определяется в основном стоимостью электроэнергии.

Структура стоимостных показателей любой СО выглядит следующим образом [1]:

- капитальные затраты на осветительные приборы (ОП) – 10 – 15 %;
- затраты на монтаж и обслуживание СО – 15 %;
- стоимость электроэнергии – 70 – 75 %.

Однако экономия электроэнергии на организацию освещения не должна достигаться за счет снижения норм освещенности в помещении, отключения части световых приборов или отказа от использования искусственного освещения при недостаточном уровне естественного освещения, поскольку потери от ухудшения условий освещения могут значительно превосходить стоимость сэкономленной энергии [1]. Поэтому эффективной можно считать такую СО, которая создает высококачественное освещение и сохраняет свои характеристики на протяжении длительной работы при наименьших эксплуатационных затратах.

Анализ литературы показывает, что расходы электроэнергии на организацию освещения достигает 80 % в структуре энергопотребления офисных зданий [1; 2]. Оптимизировать энергопотребление можно за счет применения УЭСО. УЭСО обеспечивают необходимые уровни освещенности в процессе работы СО в соответствии с заданной программой, минимизируя при этом расход электроэнергии [2].

При использовании УЭСО снижение энергопотребления достигается за счет нескольких факторов.

Во-первых, как правило, при избыточном количестве светильников создаваемая в помещении освещенность выше необходимого уровня и может автоматически уменьшаться до требуемого значения, что снижает энергопотребление на 15 – 25 %.

Во-вторых, наиболее значительного снижения потребления электроэнергии можно добиться при более широком использовании естественного освещения, так как в течение достаточно большого промежутка времени в течение суток система искусственного освещения может не использоваться, или использоваться на минимальную мощность [3].

По нашим расчетам, проведенным в нескольких типовых помещениях с оконными проемами, использование УЭСО, учитывающей уровень естественной освещенности, позволяет снизить энергопотребление на 25 – 40 % (см. рис. 1).

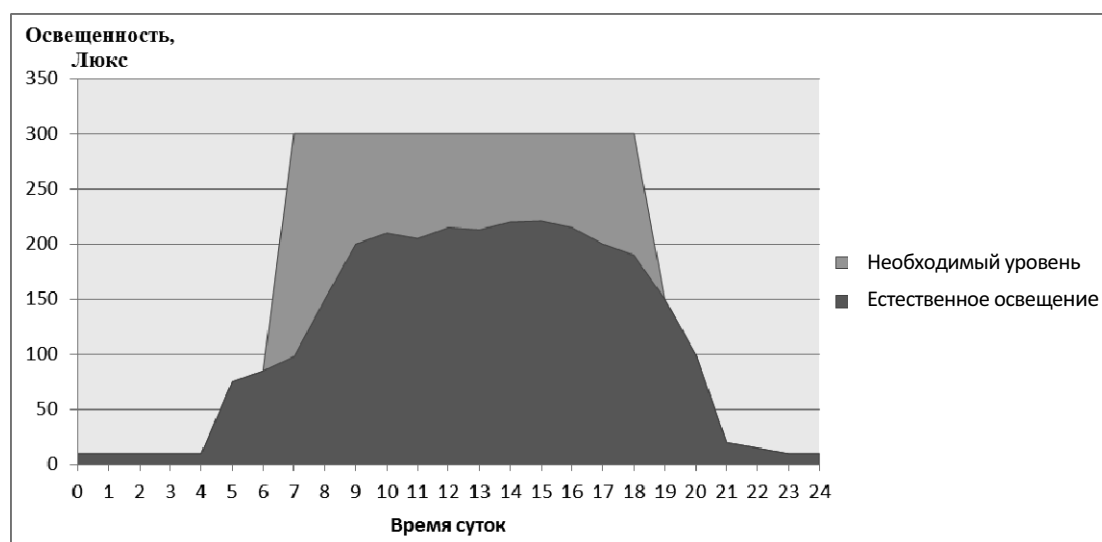


Рис. 1. Уровень естественного освещения в течение суток в помещении

В-третьих, суммарная наработка СО в условиях отсутствия автоматического управления превышает целесообразные значения, так как искусственное освещение остается включенным и при отсутствии в помещениях людей.

Проблемы

Проведенный анализ показал, что предлагаемые сегодня на рынке УЭСО не способны использовать весь возможный потенциал энергосбережения при организации искусственного освещения. Контроллеры УЭСО работают, как правило, только с двумя датчиками (освещенности и движения) и не способны учитывать особенности помещения, параметры маршрутов перемещения людей внутри помещения, времени суток и т.д.

Цель и задачи

Целью работы является исследование, разработка и внедрение УЭСО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить существующие подходы к построению УЭСО;
- спроектировать и реализовать УЭСО различной конфигурации в административных помещениях университета;
- проанализировать параметры работы полученных УЭСО и выявить возможные пути совершенствования УЭСО.

Принципы построения УЭСО

В зависимости от принципа построения различают два типа УЭСО [4]:

- 1) одноуровневая УЭСО;
- 2) двухуровневая УЭСО.

В одноуровневой УЭСО обработка информационного сигнала (данные об освещенности, присутствии людей, сигналы ручного управления и т.д.) осуществляется на единственном уровне контроллера (К) (см. рис. 2). Информационные сигналы вырабатываются соответствующими датчиками (Д), после чего поступают в контроллер. В соответствии с заложенным в него алгоритмом контроллер вырабатывает управляющий сигнал (команда на регулирование, включение или отключение), поступающий на исполнительные блоки, определяющие режим работы осветительного прибора. Ввиду практически полной незащищенности от сбоев в контроллере, при которых происходит нарушение работы всей УЭСО, одноуровневые УЭСО целесообразно использовать для одной или нескольких групп близко расположенных светильников, т.е. для реализации локальных УЭСО.

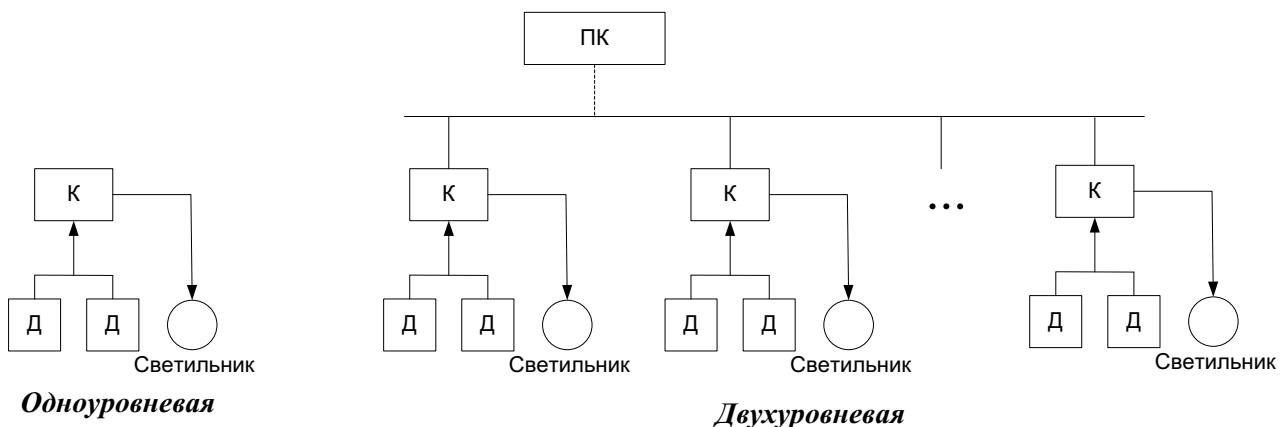


Рис. 2. Принципы построения УЭСО

Для решения задач централизованного управления логично использовать двухуровневые УЭСО (см. рис. 2). При этом система содержит некоторое количество контроллеров первого уровня, размещенных вблизи управляемых осветительных приборов. Эти устройства в совокупности с датчиками образуют первый уровень управления (т.е. фактически являются локальными УЭСО). Централизованное управление второго уровня осуществляется с центрального поста персональной ЭВМ, взаимодействующей уже не с отдельными датчиками и

светильниками, а с контроллерами первого уровня. ЭВМ в основном выполняет функции контроля состояния объекта управления (ОУ) и задания режимов работы системы, а локальные контроллеры – учет требований индивидуальных пользователей и непосредственное управление освещением.

Двухуровневая УЭСО сохраняет частичную работоспособность при отказе любых ее элементов и предоставляет большие возможности по интеграции СО с другими информационными системами. Например, возможна интеграция с системой видеонаблюдения (в частности, охранного): при срабатывании датчика движения одновременно с включением ОП будет начата видеозапись с камеры видеорегистратором.

Структура УЭСО

Структурная схема УЭСО изображена на рис. 3. В состав системы входят следующие блоки: контроллеры локальных систем управления освещением (КЛС), интерфейс ввода/вывода (ИВВ), датчики, исполнительные устройства и ПК (при двухуровневой УЭСО) [5].

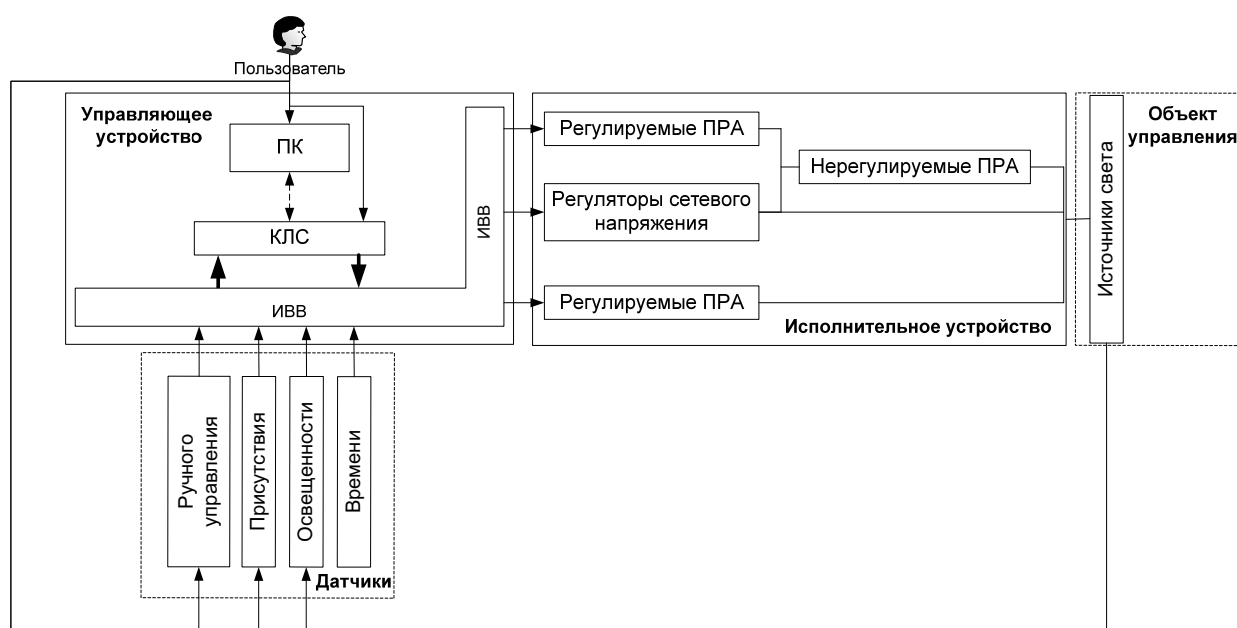


Рис. 3. Структурная схема УЭСО

Датчики освещенности предназначены для контроля освещенности на рабочем месте или естественной освещенности. В качестве датчика освещенности может быть использован любой светочувствительный прибор.

Датчики присутствия (используются только в системах управления внутренним освещением) предназначены для отключения светильников при отсутствии людей в помещении (с заданной временной задержкой). Принцип действия датчиков основан на регистрации прерывания луча движущимися объектами.

Контроллеры локальных систем управления освещением содержат в оперативной памяти сценарий работы СО и обеспечивают его реализацию.

В зависимости от выполняемой функции и вида нагрузки исполнительные устройства можно разделить на три группы:

1) Переключатели. Предназначены для полного или частичного включения или отключения ламповой нагрузки от сети. Переключатели могут быть электромеханическими (реле), статическими и «гибридными».

2) Регуляторы сетевого напряжения. Предназначены для плавного или дискретного регулирования светового потока ОП. К лампам накаливания регуляторы подключаются непосредственно, а к люминесцентным лампам – через пускорегулирующие аппараты (ПРА).

3) Регулируемые ПРА. Принцип действия регулируемых ПРА основан на изменении их внутреннего импеданса, поэтому при использовании таких ПРА регуляторы сетевого напряжения не требуются. Существуют два вида регулируемых ПРА: регулируемые электромагнитные ПРА (ЭмПРА) и регулируемые электронные ПРА (ЭПРА).

Как правило, в современных УЭСО применяются устройства, называемые датчиками освещенности/присутствия, совмещающие в себе датчик освещенности, датчик присутствия, КЛС и исполнительное устройство (переключатель).

ПК позволяет задавать сценарии освещения для локальных систем, собирать и хранить информацию о функционировании локальных систем и предназначена для решения задач централизованного управления, диспетчеризации и реализации сложных алгоритмов управления в УЭСО.

Для организации связи между компонентами УЭСО используются стандартизованные протоколы связи, например: аналоговый стандарт 0-10V DC, аналоговый стандарт AMX192, цифровой стандарт DMX-512, цифровой стандарт DALI, цифровой стандарт X10, цифровой стандарт KNX/EIB, цифровой стандарт BACnet и др.

Реализация УЭСО во внутренних помещениях административного здания АмГПУ

С целью оценки потенциала снижения энергозатрат на организацию освещения при использовании одноуровневых УЭСО были разработаны и внедрены в процессы энергосбережения системы управления освещением с различной конфигурацией [5]. Выбор диммируемой или недиммируемой УЭСО обусловлен наличием оконных проемов в помещении.

УЭСО коридорных помещений без оконных проемов

В коридорных помещениях первого этажа общей площадью 250 м² была реализована недиммируемая одноуровневая УЭСО, состоящая из 6 независимых сегментов, суммарно включающих в себя 40 светильников типа ЛВО 4 * 18 (см. рис. 4). В зависимости от площади сегмента использовались два типа датчиков: Esylux MD-C360i/24 (тип А) и Esylux MD-C360i/8 (тип Б) с радиусами действия 24 м и 8 м соответственно. С целями снижения потребления электроэнергии светильниками и увеличения срока службы люминесцентных ламп, а также устранения мерцания света [7], электромагнитные пускорегулирующие аппараты (ЭмПРА) были заменены на современные ЭПРА OSRAM 4 × 18 QUICTRONIC PROFESSIONAL.

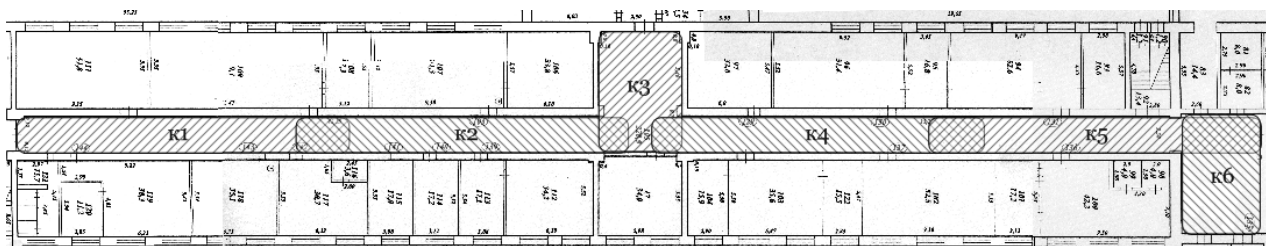


Рис. 4. Одноуровневая УЭСО коридорных помещений первого этажа университета

Анализ собранных статистических данных показал, что переход от использования стандартной системы управления освещением (СУО) к использованию одноуровневой УЭСО позволил снизить энергозатраты на обеспечение освещением указанных коридорных помещений в среднем на 31 % (см. рис. 5).

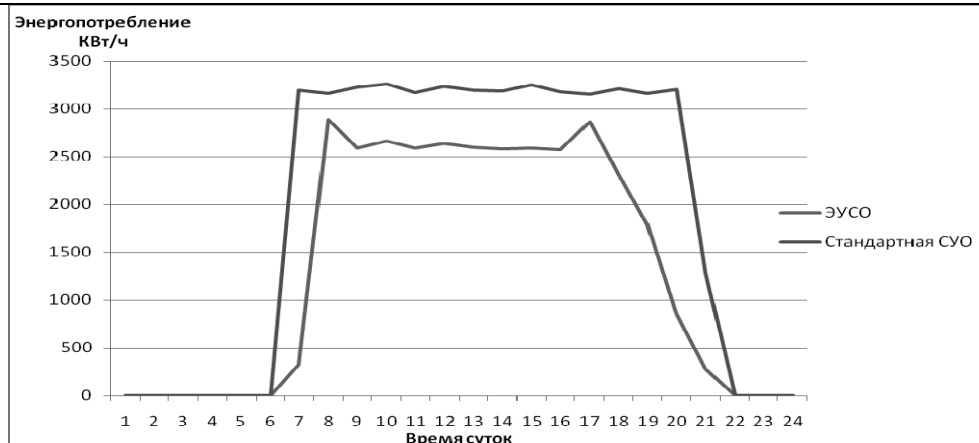


Рис. 5. Зависимость потребляемой электроэнергии от времени суток при использовании стандартной СУО и УЭСО в коридорных помещениях

УЭСО офисных помещений с оконными проемами

В двух офисных помещениях общей площадью 70 м² были установлены диммируемые одноуровневые УЭСО. Возможность диммирования позволила учитывать уровень естественной освещенности при работе системы. УЭСО включает в себя 2 независимых сегмента по 4 светильника типа ЛВО 4 * 18 каждый. Для построения УЭСО использовались счетчик электроэнергии Меркурий 200.2 с CAN интерфейсом, модуль управления OSRAM DALI MULTI 3 и датчик OSRAM LS/PD MULTI 3 с радиусом действия до 8 м. Для обеспечения возможности диммирования светильников с использованием протокола DALI, а также для устранения недостатков ЭмПРА были установлены ЭПРА OSRAM QTI DALI 4 × 18 DIM.

В результате перехода от использования стандартной СУО к использованию одноуровневой диммируемой УЭСО удалось снизить энергозатраты на обеспечение освещением этих помещений в среднем на 54 % (см. рис. 6).

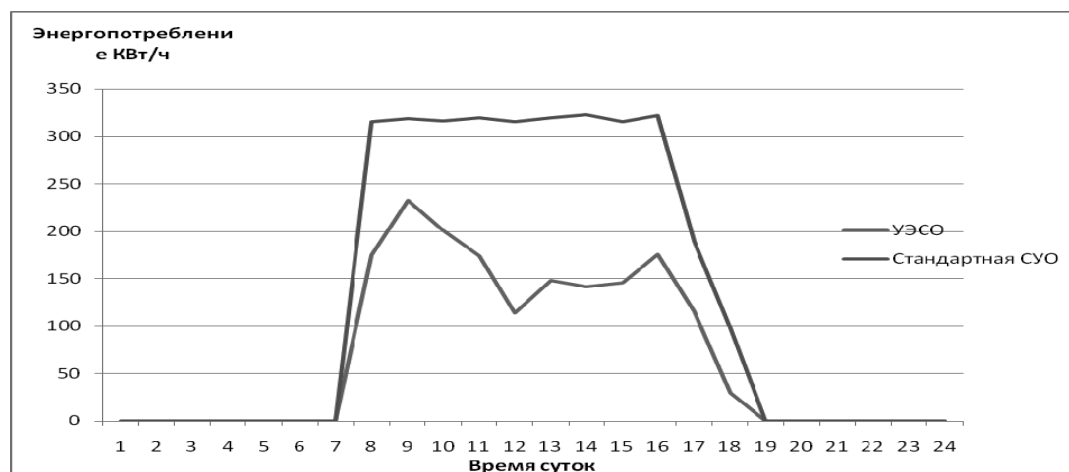


Рис. 6. Зависимость потребляемой электроэнергии от времени суток при использовании стандартной СУО и УЭСО в офисных помещениях

УЭСО коридорных помещений с оконными проемами

Двухуровневая УЭСО была реализована в коридорных помещениях 1 и 2 этажей общей площадью 600 м² (см. рис. 7) и включает в себя 63 светильника типа ЛВО 4 * 18, датчики, ЭПРА OSRAM QTI DALI 4 × 18 DIM, блоки питания KNX, шлюз KNX/DALI и IP шлюз. Использование в УЭСО протоколов KNX и DALI позволило избавиться от недостатков каждой из технологий и использовать их преимущества в полном объеме [8; 9].

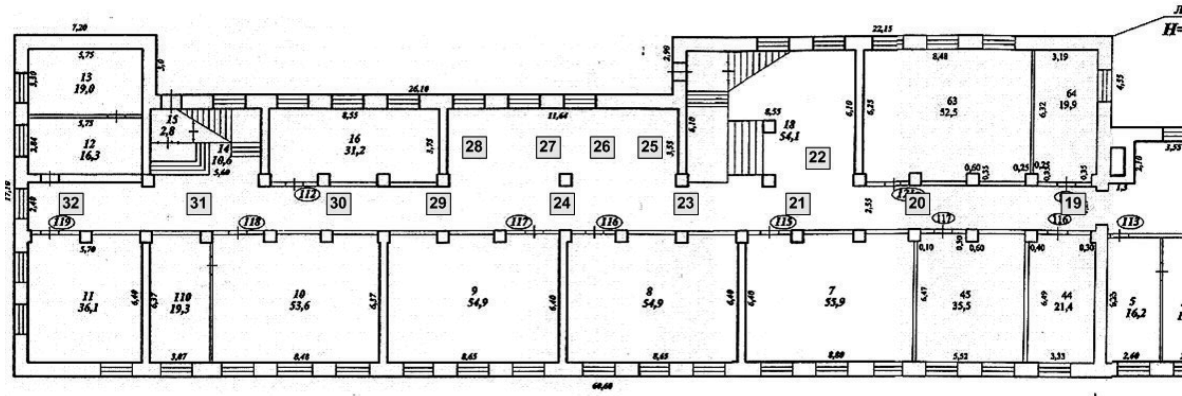


Рис. 7. Сегмент УЭСО коридорных помещений 1 и 2 этажей университета

Для решения задач централизованного управления и мониторинга созданной двухуровневой УЭСО было разработано программное обеспечение (ПО) «Программный регулятор KNX-системы освещения» (см. рис. 8) и установлено на ПК диспетчера. Ядром разработанного ПО является модуль, способный принимать и отправлять телеграммы в линии связи KNX и DALI. ПО позволяет просматривать состояние каждого элемента системы искусственного освещения, сохранять в проекте иерархическую структуру помещений, указывать неограниченное количество источников освещения, а также сохранять и выполнять для источников освещения различные команды. Поддерживается групповое управление источниками освещения.

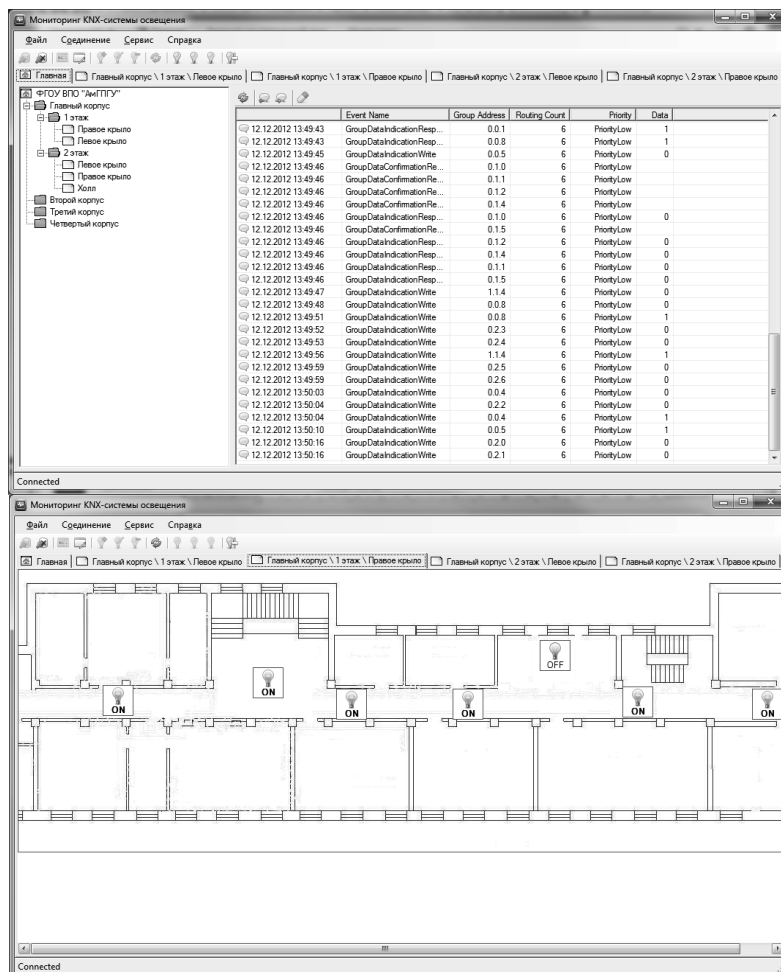


Рис. 8. ПО для централизованного управления двухуровневой УЭСО

В результате перехода от использования стандартной СУО к использованию двухуровневой диммируемой УЭСО удалось снизить энергозатраты на обеспечение освещением этих помещений в среднем на 51 % (см. рис. 9).

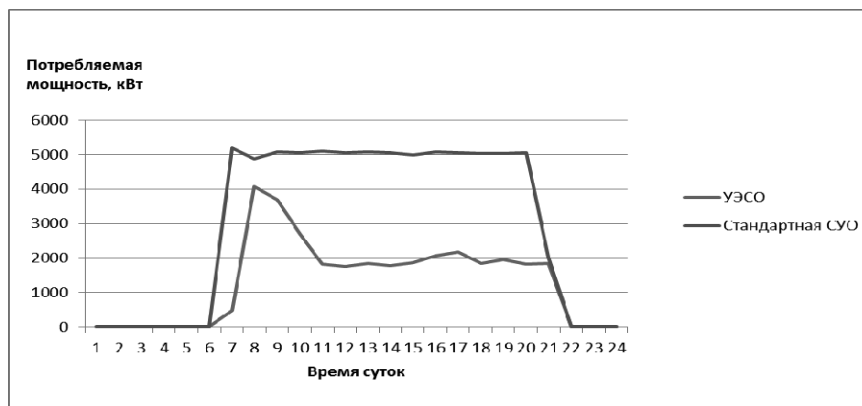


Рис. 9. Зависимость потребляемой электроэнергии от времени суток при использовании стандартной СУО и двухуровневой УЭСО в коридорных помещениях с оконными проемами

Разработка интеллектуальной системы управления УЭСО

Анализ параметров работы спроектированных и реализованных УЭСО показал, что УЭСО, построенные на базе существующих сегодня автоматических контроллеров, не являются оптимальными. По нашему мнению, анализ ряда дополнительных параметров, использование знаний о помещении, маршрутах перемещения людей и правилах изменения освещенности в помещении при работе УЭСО позволит снизить энергозатраты на организацию освещения. Этим объясняется необходимость перехода от УЭСО к интеллектуальной энергосберегающей системе освещения (ИЭСО), использующей в работе аппараты нечеткой логики и механизмы интеллектуальных системы управления (см. рис. 10).

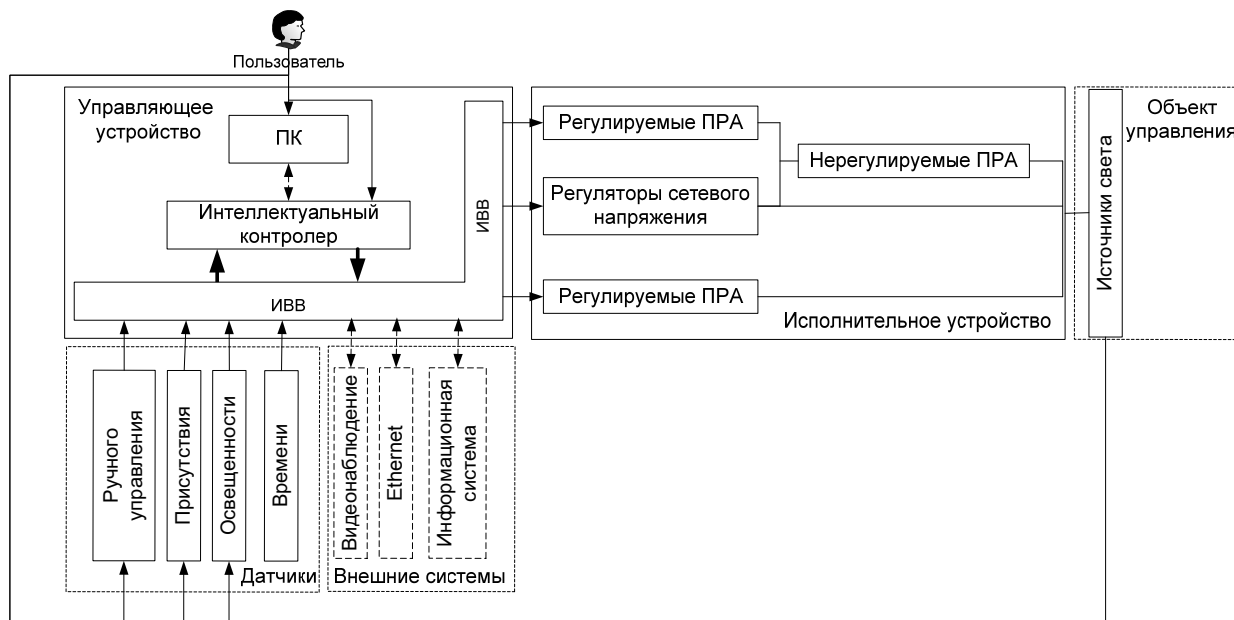


Рис. 10. Функциональная схема интеллектуальной УЭСО

ИЭСО должна выполнять следующие функции:

- хранить знания о санитарных нормах и правилах искусственного освещения;
- накапливать знания об окружающем систему мире, инициировать процессы получения новых знаний, осуществлять соотнесение новых знаний с ранее хранимыми;
- пополнять поступившие знания с помощью логического вывода, отражающего закономерности в окружающем систему мире в накопленных ею ранее знаниях, получать обобщенные знания на основе более частных знаний и логически планировать свою деятельность;
- общаться с человеком на языке, максимально приближенном к естественному человеческому языку;
- уметь формировать для себя или по просьбе человека (пользователя) объяснение собственной деятельности;
- управлять любыми исполнительными устройствами системы вне зависимости от их расположения и назначения;
- интегрироваться с внешними системами (видеонаблюдение, сети передачи данных и т.д.) для обмена данными.

Работа ИЭСО строится на следующих данных и знаниях:

- 1) данных о помещении: форма, размер, размещение рабочих мест и мебели, месторасположение окон и т.д.;
- 2) данных о фактическом или желаемом месторасположении светильников;
- 3) желаемой карты освещенности;
- 4) карты движения людей в помещении.

Функциональная схема интеллектуального контроллера представлена на рис. 11.

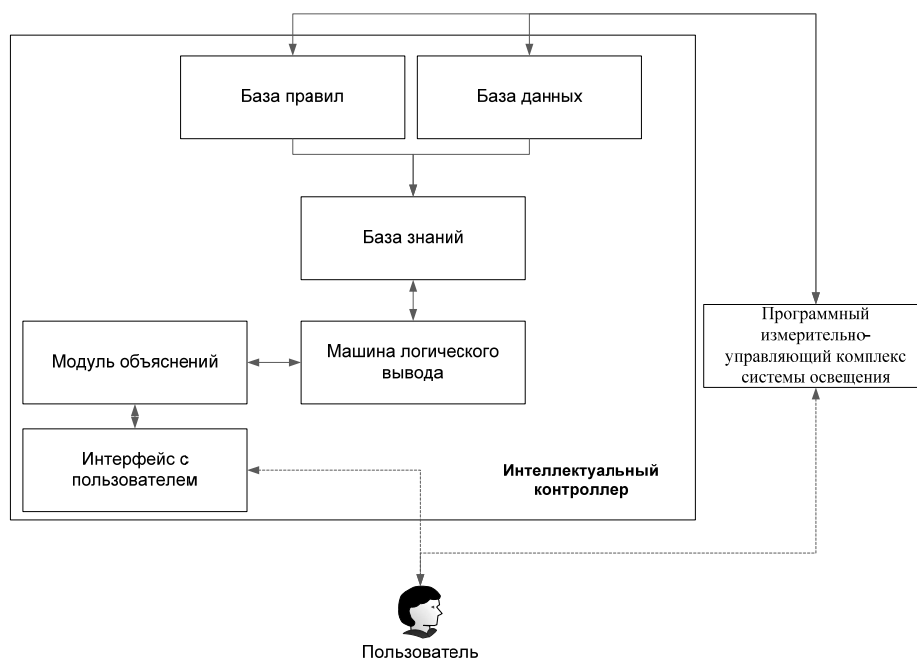


Рис. 11. Функциональная схема интеллектуального контроллера

В настоящий момент начата реализация некоторых функций интеллектуальной УЭСО.

Работа интеллектуальной системы управления невозможна без необходимого объема информации, ее анализа и формализации закономерностей в предметной области [10; 11; 12].

Для сбора данных, выявления закономерностей и последующего формирования баз данных и баз знаний ИЭСО было разработано ПО «Программный измерительно-управляющий комплекс системы освещения» (см. рис. 12). ПО позволяет в режиме реального времени изменять параметры работы источников искусственного света, получать из шины данные о

системе и окружающей среде, получать от счетчика электроэнергии данные о накопленной энергии, текущие значения активной мощности, тока и напряжения. Данные, полученные в ходе работы ПО, сохраняются в базе данных и могут быть использованы для дальнейшего анализа пользователем или интеллектуальным контроллером. В программе реализован интерпретатор скриптов, синтаксически схожих с языком программирования Basic. Функциональная схема ПО приведена на рис. 13.

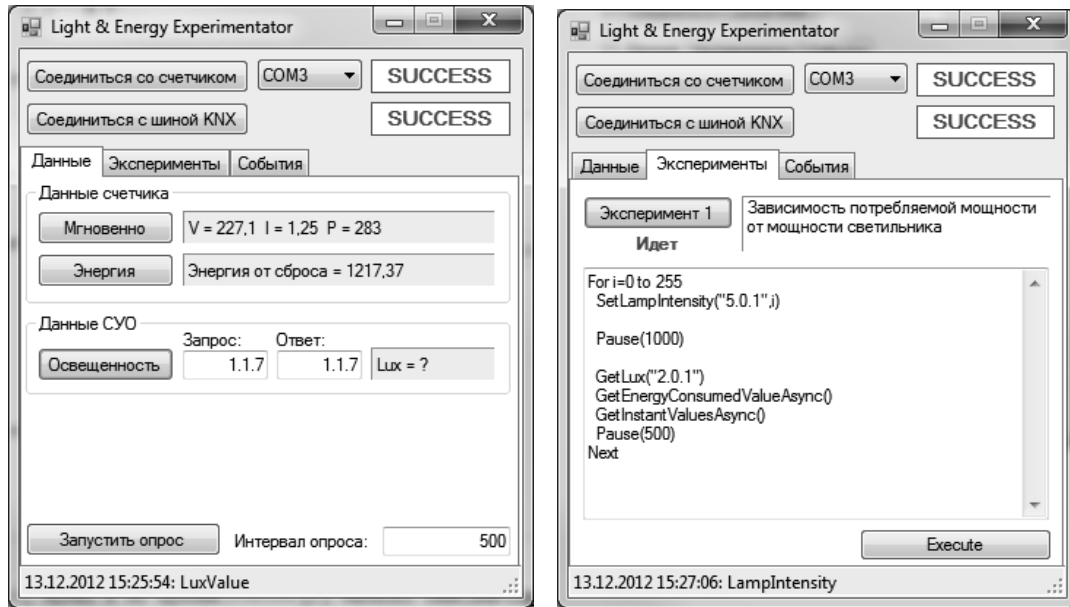


Рис. 12. Программное обеспечение для исследования закономерностей между параметрами работы УЭСО



Рис. 13. Функциональная схема ПО для исследования закономерностей между параметрами работы УЭСО



Заключение

Реализация интеллектуальной УЭСО позволит значительно снизить общий уровень энергопотребления и приведет к повышению удобства пользователей за счет новых функциональных возможностей, таких, как:

- контроль состояния помещений, а именно: контроль количественных и качественных характеристик освещения в различных зонах помещения; контроль наличия людей в помещении;
- контроль состояния органов ручного управления освещением; контроль исправности светильников и режима их работы, контроль напряжения, тока, энергопотребления осветительной установки, а также характеристик качества электроэнергии;
- включение и выключение освещения в помещении полностью или по группам светильников; плавная регулировка светового потока каждого светильника или отдельных групп светильников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосбережение в освещении / под ред. проф. Ю. Б. Айзенберга. – М.: Знак, 1999. – 264 с.
2. Агафонов, Г. А. На пути к полному контролю / Г. А. Агафонов // Install Pro Magazine. – 2005. – № 6(36). – С. 68-69.
3. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
4. Амосов, О. С. Автоматизированная система управления освещением организации / О. С. Амосов, М. Е. Елисеев, А. С. Тихонов // Актуальные проблемы математики, физики, информатики в вузе и школе: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 23 марта 2012 г. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во АмГПУ, 2012. – С. 37-41.
5. Амосов, О. С. Структура автоматизированной системы управления освещением организации / О. С. Амосов, М. Е. Елисеев, А. С. Тихонов // Актуальные проблемы математики, физики, информатики в вузе и школе: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 23 марта 2012 г. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во АмГПУ, 2012. – С. 41-45.
6. Панфилов, Д. И. Централизованное управление внутренним освещением / Д. И. Панфилов, Е. М. Смирнов, В. Д. Поляков, Ю. Д. Поляков // Chip News. – 2005. – № 1. – С. 22-25.
7. Варфоломеев, Л. П. Электронные пускорегулирующие аппараты и системы управления освещением. Новости светотехники: вып. 1(36) / Л. П. Варфоломеев; под ред. Ю. Б. Айзенберга. – М.: Дом Света, 2002. – 15 с.
8. Режим доступа: <http://www.dali-ag.org/>
9. Режим доступа: <http://knx.org/>
10. Соловьев, В. А. Автоматизация синтеза нечетких подсистем экспертной системы промышленного предприятия / В. А. Соловьев, М. А. Горькавый // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2010. – № 1. – С. 27-35.
11. Деменков, Н. П. Нечеткий логический регулятор в задачах управления / Н. П. Деменков, И. А. Мочалов // Промышленные контроллеры и АСУ. – 1999. – № 2. – С. 43-47.
12. Круглов, В. В. Нечетная логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.

Жеребко К. В., Петров М. Р., Петрова А. Н.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

ДЛЯ РАСЧЕТА ШАРНИРНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С БОЛЬШИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ УЗЛОВ

Жеребко К. В., Петров М. Р., Петрова А. Н.

K. V. Zherebko, M. R. Petrov, A. N. Petrova

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ШАРНИРНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С БОЛЬШИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ УЗЛОВ

USING ELECTROMECHANICAL ANALOGIES FOR THE CALCULATION OF HINGED-ROD SYSTEMS WITH A LARGE TRAVERSE

Жеребко Константин Всеволодович – профессор, кандидат технических наук, с 2003 года – профессор кафедры теоретической и прикладной механики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Год смерти 2005.

Mr. Konstantin V. Zherebko – PhD in Engineering, Professor, Department of Theoretical and Applied Mechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. Died in 2005.

Петров Михаил Радиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры механики и анализа конструкций и процессов. E-mail: ktpm@knastu.ru,

Mr. Mikhail R. Petrov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanics and Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: ktpm@knastu.ru.

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru

Ms. Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена дополнению используемой в настоящее время системы электромеханических аналогий аналогами второго закона Кирхгофа и ЭДС в механике и разработке метода расчета шарнирных стержневых систем из гиперэластичного материала без применения метода последовательных нагружений на основе данных аналогий.

Summary. The paper's goal is to complement the currently used system of electromechanical analogies by the analogues of Kirchhoff's second law and EMF in mechanics, and to propose a method for calculating hinged-rod systems made from super-flexible materials without application of load sequences, proceeding from these analogies

Ключевые слова: шарнирно-стержневые конструкции, большие перемещения, метод узловых координат, электромеханические аналогии, гидробиотехническое сооружение.

Key words: hinged-rod design, large displacement, method of nodal coordinates, electromechanical analogies, hydro-bio-technical facility.

УДК 001.891.573:531

Сложность расчета безмоментных стержневых конструкций при больших перемещениях узлов (шарниров), сравнимых с размерами самой конструкции, связана с необходимостью применения метода последовательных нагружений. В настоящее время этот недостаток компенсируется применением совершенных и быстродействующих программных продуктов. Эти сложные реальные расчеты выполняются людьми, хорошо владеющими компьютером, но не всегда понимающими постановку задачи, не знающими идеи применяемого ими метода. Особенно часто такая ситуация встречается в области использования численных методов. Эти методы настолько хорошо разработаны и адаптированы к компьютерной технике, что расчетчику может показаться достаточным для решения задачи только лишь наличия ком-



пьютера и программного обеспечения. Для решения задачи и правильного понимания полученного результата этого не достаточно [1].

Из вышесказанного следует, что, несмотря на имеющиеся на вооружении расчетчика совершенные программные продукты, необходимо продолжать изучение и совершенствование методологической базы расчета конструкций и моделирования процессов, в том числе и за счет применения принципов из других областей знаний.

Возможно, применение принципов методов электротехники может дать положительные результаты для совершенствования методов расчета шарнирных стержневых конструкций с большими перемещениями узлов и других проблем [2].

В представляемой работе описан новый метод расчета шарнирной стержневой системы, нагруженной в узлах, – метод узловых координат. Данный метод основан на электротехническом методе расчета электрических цепей – методе узловых потенциалов.

Применение аналитических принципов электротехники в строительной механике предполагает наличие в этих областях знания аналогичных законов, которые имеют одинаковое математическое выражение в виде сходных уравнений. Поэтому первая часть статьи посвящена дополнению существующей системы электромеханических аналогий новой аналогией. Вторая часть статьи посвящена непосредственно методу узловых координат.

Дополнение системы электромеханических аналогий аналогами второго закона Кирхгофа и ЭДС в механике

Разработка метода узловых координат осуществляется на основе системы аналогий, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Система электромеханических аналогий

Электротехника	Механика
1-й закон Кирхгофа: $\sum_{i=1}^n I_{ij} = 0$	Условия равновесия сил в узлах: $\sum_{i=1}^g N_{ij} \vec{k}_{ij} = 0$
2-й закон Кирхгофа: $\sum_{i=1}^w (\varepsilon_{ij} + I_{ij} R_{ij}) = 0$	Контурное условие совместности деформаций: $\sum_{i=1}^w (l_{0ij} + N_{ij} G_{ij}) \vec{k}_{ij} = 0$
Электродвижущая сила: ε_{ij}	Проекция начальной длины стержня после деформации: $l_{0ij} k_{ij}$
Активное сопротивление: $R_{ij} = \rho \frac{l_{0ij}}{S_{ij}}$	Податливость стержня: $G_{ij} = \frac{l_{ij}}{ES_{ij}}$
Закон Ома: $U_{ij} = I_{ij} \rho \frac{l_{0ij}}{S_{ij}}$	Закон Гука: $\Delta l_{ij} = N_{ij} \frac{1}{E} \frac{l_{0ij}}{S_{ij}}$
Падение напряжения: U_{ij}	Удлинение стержня: Δl_{ij}
Разность потенциалов: $\Delta \varphi = U = \frac{dW}{dI}$	Перемещение точки: $\delta = \frac{\partial U}{\partial N}$
Электрический ток: I_{ij}	Проекция усилия: $N_{ij} m_{ij}$
Энергия в электрической ветви: $\mathcal{E}_{ij} = \frac{I_{ij}^2 l_{ij}}{\frac{1}{\rho} S_{ij}}$	Потенциальная энергия стержня: $\mathcal{E}_{ij} = \frac{N_{ij}^2 l_{0ij}}{ES_{ij}}$
Теорема взаимности: $E_m g_{nk} = E_k g_{km}$	Теорема о взаимности работ: $P_1 \delta_{A2} = P_2 \delta_{B1}$

В данной таблице аналогий условия равновесия сил в узлах фермы в точности (в проекциях) соответствуют первому закону Кирхгофа

$$\sum_{i=1}^n \vec{N}_{ij} + \vec{P}_j = 0,$$

где \vec{P}_j – внешняя сила в узле j .

Второму закону Кирхгофа должно соответствовать утверждение: “Векторная сумма длин сторон в замкнутом стержневом контуре равна нулю в любой момент деформации до потери конструкцией несущей способности” [3]. Для любого стержневого контура:

$$\sum_{i,j=1}^{m,n} \vec{l}_{ij} = \sum_{i,j=1}^{m,n} (l_{0ij} + \Delta l_{ij}) \vec{k}_{ij} = \sum_{i,j=1}^{m,n} (l_{0ij} + N_{ij} \frac{l_{0ij}}{ES_{ij}}) \vec{k}_{ij} = 0.$$

В таблице аналогий добавлен новый элемент: принято, что электродвижущая сила в ветви ε_{ij} аналогична $l_{0ij} k_{ij}$. В используемых до настоящего времени двух системах электро-механических аналогий подобного соответствия нет. В одной из них ЭДС соответствует сила, в другой – нет аналога ЭДС.

Данная система аналогий расширена введением закономерностей, известных в теории шарнирно-стержневых систем, в том числе: теорема о взаимности работ, теорема Кастилиано, и т.д. На конкретных стержневых системах была проверена численным экспериментом справедливость аналогий, разработана (на основе теории подобия) методика осуществления реальных электрических схем, т.к. многие параметры механических конструкций в электрических моделях физически трудно или вообще невозможно осуществить без коэффициентов подобия.

Поскольку электрическая модель и объект описываются идентичными уравнениями, то электрическая модель более адекватно описывает процессы, происходящие в объекте. В дальнейшем предполагается исследование ее применения для моделирования динамического нагружения.

Метод узловых координат

Помимо этого, полная модель позволяет применить аналитические методы электротехники к расчету параметров стержневых систем, например, для анализа положения узлов шарнирной стержневой системы после нагружения через расчет координат ее узлов. Для этого применяется разработанный авторами метод узловых координат, основанный на принципах, аналогичных принципам метода узловых потенциалов.

Запишем условие равновесия сил в узлах стержневой системы, реакция опор считается известной внешней силой для каждого узла:

$$\sum_{j=1}^f N_{ij} \vec{k}_{ij} + \vec{P}_i = 0; \quad (1)$$

здесь f – количество стержней сходящихся в узле i ; число независимых уравнений, естественно, равно количеству узлов без одного.

Исследуем выражение для изменения длины стержня в процессе деформации, это $(l_{ij} \pm \Delta l_{ij}) \vec{k}_{ij}$, вектор \vec{k}_{ij} имеет направляющие косинусы m_{ij} и n_{ij} . Длину стержня можно выразить из соотношения векторов в треугольнике, составленном из этого стержня, и \vec{r}_i , \vec{r}_j – радиус-векторов узлов стержня (контур любой замкнутой)

$$(l_{ij} \pm \Delta l_{ij}) \vec{k}_{ij} + \vec{r}_j - \vec{r}_i = 0; \quad (2)$$

здесь стержень с индексами ij является замыкающим вектором контура, две другие стороны которого есть \vec{r}_i и \vec{r}_j . Мы не знаем знака удлинения Δl_{ij} в конкретном стержне, поэтому, для определенности, пусть все стержни будут растянуты. Удлинение стержня определим из скалярного соотношения:

$$\Delta l_{ij} = N_{ij} \frac{l_{ij}}{E_{ij} S_{ij}}. \quad (3)$$

В общем случае, конечно, E_{ij} и S_{ij} являются функциями N_{ij} , но, для иллюстрации сущности подхода, ограничимся случаем, когда их изменением можно пренебречь, и они постоянны в процессе нагружения.

Выражение (2) при таких условиях имеет вид:

$$\left(l_{ij} + N_{ij} \frac{l_{ij}}{E_{ij} S_{ij}} \right) \vec{k}_{ij} + \vec{r}_j - \vec{r}_i = 0.$$

Следовательно, продольная сила в стержне:

$$N_{ij} \vec{k}_{ij} = \left[(\vec{r}_i - \vec{r}_j) - l_{ij} \vec{k}_{ij} \right] \frac{E_{ij} S_{ij}}{l_{ij}}$$

Подставив продольное усилие в условия равновесия (1), имеем:

$$\sum_{j=1}^f \left[(\vec{r}_i - \vec{r}_j) - l_{ij} \vec{k}_{ij} \right] \frac{E_{ij} S_{ij}}{l_{ij}} + \vec{P}_i = 0. \quad (4)$$

Раскроем систему уравнений (4) для произвольной статически неопределимой фермы (см. рис. 1).

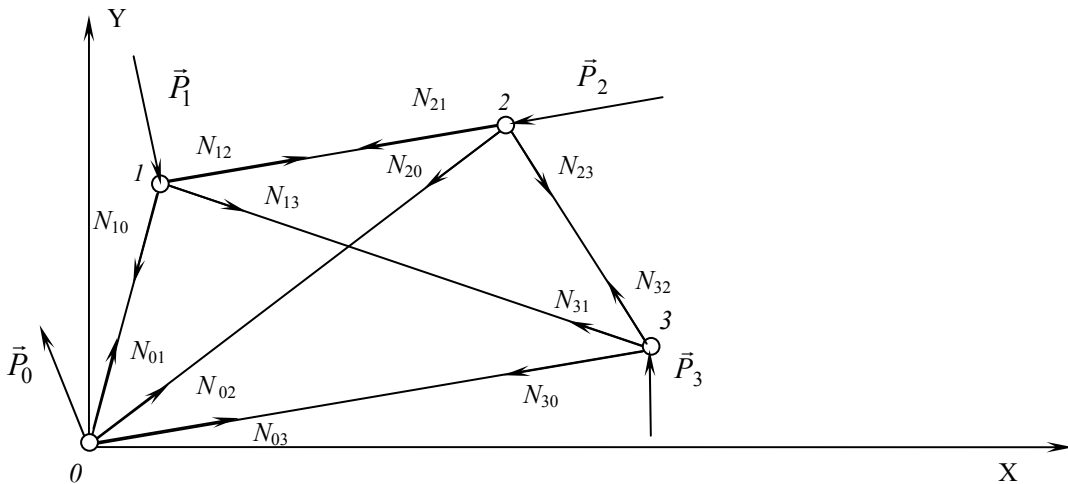


Рис. 1. Схема произвольной статически неопределимой шарнирно-стержневой системы

Одну из опор, закрепленную неподвижно, помещаем в начале координат, поэтому $\vec{r}_0 = 0$ всегда; расчетная схема всегда в первом квадранте, поэтому \vec{r}_i и \vec{r}_j всегда имеют положительные направляющие косинусы. Условий равновесия здесь четыре, но независимых уравнений только три, поэтому исключим из рассмотрения узел в начале координат. Кроме того, $N_{ij} = N_{ji}$, но $\vec{k}_{ij} = -\vec{k}_{ji}$. Система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} & \left[(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) - l_{12} \vec{k}_{12} \right] \frac{E_{12} S_{12}}{l_{12}} + \left[(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) - l_{13} \vec{k}_{13} \right] \frac{E_{13} S_{13}}{l_{13}} + \left[(\vec{r}_1 - \vec{r}_0) - l_{10} \vec{k}_{10} \right] \frac{E_{10} S_{10}}{l_{10}} + \vec{P}_1 = 0, \\ & \left[(\vec{r}_2 - \vec{r}_3) - l_{23} \vec{k}_{23} \right] \frac{E_{23} S_{23}}{l_{23}} + \left[(\vec{r}_2 - \vec{r}_0) - l_{20} \vec{k}_{20} \right] \frac{E_{20} S_{20}}{l_{20}} + \left[(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) - l_{21} \vec{k}_{21} \right] \frac{E_{21} S_{21}}{l_{21}} + \vec{P}_2 = 0, \\ & \left[(\vec{r}_3 - \vec{r}_0) - l_{30} \vec{k}_{30} \right] \frac{E_{30} S_{30}}{l_{30}} + \left[(\vec{r}_3 - \vec{r}_1) - l_{31} \vec{k}_{31} \right] \frac{E_{31} S_{31}}{l_{31}} + \left[(\vec{r}_3 - \vec{r}_2) - l_{32} \vec{k}_{32} \right] \frac{E_{32} S_{32}}{l_{32}} + \vec{P}_3 = 0. \end{aligned}$$

Обозначим комбинацию параметров стержня (множители при квадратных скобках), характеризующих сопротивление стержня деформированию через $\omega_{ij} = \omega_{ji}$ – жесткость стержня; тогда, после несложных преобразований, с учетом того, что $\vec{r}_0 = 0$:

$$\begin{cases} \vec{r}_1(\omega_{12} + \omega_{13} + \omega_{10}) - \vec{r}_2\omega_{12} - \vec{r}_3\omega_{13} = -\vec{P}_1 + l_{12}\omega_{12}\vec{k}_{12} + l_{13}\omega_{13}\vec{k}_{13} + l_{10}\omega_{10}\vec{k}_{10}, \\ -\vec{r}_1\omega_{21} + \vec{r}_2(\omega_{23} + \omega_{20} + \omega_{21}) - \vec{r}_3\omega_{23} = -\vec{P}_2 + l_{23}\omega_{23}\vec{k}_{23} + l_{20}\omega_{20}\vec{k}_{20} + l_{21}\omega_{21}\vec{k}_{21}, \\ -\vec{r}_1\omega_{31} - \vec{r}_2\omega_{32} + \vec{r}_3(\omega_{31} + \omega_{30} + \omega_{32}) = -\vec{P}_3 + l_{30}\omega_{30}\vec{k}_{30} + l_{31}\omega_{31}\vec{k}_{31} + l_{32}\omega_{32}\vec{k}_{32}. \end{cases}$$

Можно диагональные коэффициенты, состоящие из суммы жесткостей стержней, сходящихся в узле, обозначить ω_{ii} и по аналогии с другими ω_{ij} назвать “узловой жесткостью” – хотя физического смысла это не имеет. Будет удобнее, если в правой части системы уравнений заменим $\omega_{ij}l_{ij} = E_{ij}S_{ij}$; и введем $\omega_{ii} = -\sum_{j=1}^f \omega_{ij}$, тогда:

$$\begin{cases} \vec{r}_1\omega_{11} + \vec{r}_2\omega_{12} + \vec{r}_3\omega_{13} = \vec{P}_1 - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{k}_{ij}, \\ \vec{r}_1\omega_{21} + \vec{r}_2\omega_{22} + \vec{r}_3\omega_{23} = \vec{P}_2 - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{k}_{ij}, \\ \vec{r}_1\omega_{31} + \vec{r}_2\omega_{32} + \vec{r}_3\omega_{33} = \vec{P}_3 - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{k}_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

Так как все расчеты ведутся в проекциях, преобразуем к скалярной форме уравнения (5), где x_i и y_i – координаты узлов:

$$\begin{cases} x_1\omega_{11} + x_2\omega_{12} + x_3\omega_{13} = P_{x1} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{m}_{ij}, \\ x_1\omega_{21} + x_2\omega_{22} + x_3\omega_{23} = P_{x2} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{m}_{ij}, \\ x_1\omega_{31} + x_2\omega_{32} + x_3\omega_{33} = P_{x3} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{m}_{ij}, \\ y_1\omega_{11} + y_2\omega_{12} + y_3\omega_{13} = P_{y1} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{n}_{ij}, \\ y_1\omega_{21} + y_2\omega_{22} + y_3\omega_{23} = P_{y2} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{n}_{ij}, \\ y_1\omega_{31} + y_2\omega_{32} + y_3\omega_{33} = P_{y3} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{n}_{ij}. \end{cases} \quad (6)$$

Уравнения в виде (6) являются алгебраической копией уравнений электрической цепи, полученных “методом узловых потенциалов” в теоретической электротехнике, и не известны в современной механике стержневых систем.

Результаты численного решения сопоставлялись с результатами, полученными общепринятым методом строительной механики. В линейных задачах они идентичны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Численное моделирование прочности и гидродинамики океанотехники / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин, С. Д. Чижиумов, И. Н. Журбина. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 340 с.
2. Математическая модель деформирования упругой связи из нестандартизированного материала для динамической системы с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. 2011. – № I-1(5). – С. 4-9.
3. Применение метода аналогий для моделирования шарнирных ферм электрическими цепями / М. Р. Петров, А. Н. Петрова, К. В. Жеребко; Комсомольский-на-Амуре госуд. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 1999. – 10 с. – Библиогр. 2 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 08.12.99 №3655-В99.

Егорова Ю. Г., Егоров В. А.
J. G. Egorova, V. A. Egorov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ЗАДАЧЕ О ВОЛОЧЕНИИ ПОЛОСЫ

PLASTIC STATE MODELLING IN THE STRIP DRAG PROBLEM

Егорова Юлия Георгиевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681021, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, д. 1, кв. 69; 8-(4217)-27-18-20. E-mail: egorova_jg@mail.ru

Ms. Julia G. Egorova – Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Information Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), 681021, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, Kotovskogo Str., 1-69; 27-18-20. E-mail: egorova_jg@mail.ru.

Егоров Владислав Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Первостроителей, д. 19, кв. 144; 8-(4217)-53-79-24. E-mail: egoroff_v@list.ru

Mr. Vladislav A. Egorov – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Drive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), 681024, Khabarovsk region, Komsomolsk-on-Amur, Pervostroiteley Pr., 19-144; 53-79-24. E-mail: egoroff_v@list.ru.

Аннотация. Рассматривается задача о волочении полосы в рамках теории плоской деформации с использованием модели жесткопластического тела. Строятся поля линий скольжения, напряжений, скоростей. Дается наглядная графическая интерпретация полученных результатов.

Summary. The paper investigates the strip drag problem in the framework of the plane deformation theory and using a rigid-plastic body model. The fields of slip-lines, stresses and velocities are built. The result of this investigations has an obvious graphical interpretation.

Ключевые слова: механика сплошных сред, теория пластичности, плоская деформация, жесткопластическое тело.

Key words: continuum mechanics, theory of plasticity, plane deformation, rigid-plastic body.

УДК 539.374

Рассматривается пластическое состояние в задаче о волочении полосы (см. рис. 1).

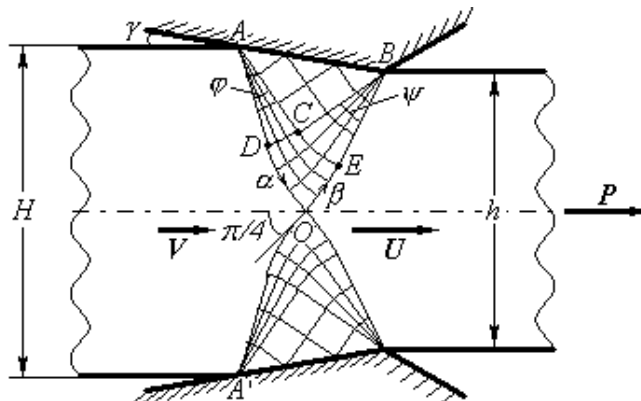


Рис. 1. Схема процесса волочения полосы

Полоса с начальной толщиной H протаскивается с постоянной скоростью V сквозь жесткую гладкую суживающуюся щель (матрицу); при этом полоса испытывает пластические деформации в области, примыкающей к матрице, и толщина полосы уменьшается до значения h . Угол между плоскостями матрицы равен 2γ . В некотором отдалении от матрицы части полосы движутся как твердое тело со скоростями U и V . Вследствие несжимаемости материала $VH = Uh$, откуда $U = VH/h$.

Основные предположения:

- материал заготовки идеально жесткопластический;
- матрица абсолютно твердая и гладкая;
- течение осуществляется в условиях плоской деформации.

Пластическое состояние описывается системой из пяти уравнений [1; 4]:

– уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

– условие текучести

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2; \quad (2)$$

– условие совпадения направлений площадок максимального касательного напряжения и максимальной скорости деформации сдвига

$$\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}} = \frac{\partial v_y / \partial y - \partial v_x / \partial x}{\partial v_x / \partial y + \partial v_y / \partial x}; \quad (3)$$

– условие несжимаемости

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

где $\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y$ – составляющие тензора напряжений; k – предел текучести; v_x, v_y – составляющие вектора скорости.

В координатной системе, связанной с линиями скольжения, уравнения (1) – (4) преобразуются к виду [2]:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\theta, \quad \frac{\sigma}{2k} - \theta = \operatorname{const} = \xi \text{ – вдоль } \alpha\text{-линии}; \quad (5)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\operatorname{ctg}\theta, \quad \frac{\sigma}{2k} + \theta = \operatorname{const} = \eta \text{ – вдоль } \beta\text{-линии}; \quad (6)$$

$$du - v d\theta = 0 \text{ – вдоль } \alpha\text{-линии}; \quad (7)$$

$$dv + u d\theta = 0 \text{ – вдоль } \beta\text{-линии}, \quad (8)$$

где θ – угол наклона касательной к линии α , отсчитываемый в положительном направлении от оси x ; σ – гидростатическое напряжение; u, v – составляющие вектора скорости в направлении линий α и β соответственно.

Построение поля линий скольжения

Со стороны гладкой матрицы на материал действует только нормальное давление. Это означает, что нормаль к AB (см. рис. 1) – главное направление тензора напряжений, и линии скольжения подходят к AB под углом $\pm \pi/4$.

Пластическая область состоит из треугольника равномерного напряженного состояния ABC , двух центрированных вееров ACD и BCE и области $CEOD$. Между углами φ и ψ раствора вееров ACD и BCE существует связь; установим ее, пользуясь соотношениями вдоль линий скольжения [1].



Пусть в ΔABC $\sigma = \sigma'$, $\xi = \xi'$, $\eta = \eta'$. Тогда по (5) и (6)

$$\xi' = \sigma'/2k - \theta_{\Delta ABC} = \sigma'/2k + \pi/4 + \gamma; \quad (9)$$

$$\eta' = \sigma'/2k + \theta_{\Delta ABC} = \sigma'/2k - \pi/4 - \gamma. \quad (10)$$

Поскольку β -линии в области ACD являются продолжениями β -линий ΔABC , то в области ACD $\eta = \eta'$. Поэтому на линии AD

$$\eta_{AD} = \eta'. \quad (11)$$

Обозначим на AD $\sigma = \sigma''$. Тогда по (6)

$$\eta_{AD} = \sigma''/2k + \theta_{AD} = \sigma''/2k - \pi/4 - \gamma - \varphi. \quad (12)$$

Сравнивая (11) и (12), получим $\eta' = \sigma''/2k - \pi/4 - \gamma - \varphi$. Подставим в это равенство (10) и установим связь между σ'' и σ' :

$$\sigma'' = \sigma' + 2k\varphi. \quad (13)$$

Найдем параметр ξ в точке D , используя (5) и (13):

$$\xi_D = \sigma''/2k - \theta_{AD} = \sigma''/2k + \pi/4 + \gamma + \varphi = \sigma'/2k + \pi/4 + \gamma + 2\varphi. \quad (14)$$

Далее, поскольку α -линии в области BCE являются продолжениями α -линий ΔABC , то в области BCE $\xi = \xi'$. Поэтому на линии BE

$$\xi_{BE} = \xi'. \quad (15)$$

Обозначим на BE $\sigma = \sigma'''$. Тогда по (5)

$$\xi_{BE} = \sigma'''/2k - \theta_{BE} = \sigma'''/2k + \pi/4 + \gamma - \psi. \quad (16)$$

Сравнивая (15) и (16), получим $\xi' = \sigma'''/2k + \pi/4 + \gamma - \psi$. Подставим в это равенство (9) и установим связь между σ''' и σ' :

$$\sigma''' = \sigma' + 2k\psi. \quad (17)$$

Найдем параметр η в точке E , используя (6) и (17):

$$\eta_E = \sigma'''/2k + \theta_{BE} = \sigma'''/2k - \pi/4 - \gamma + \psi = \sigma'/2k - \pi/4 - \gamma + 2\psi. \quad (18)$$

Точка O по симметрии лежит на оси полосы и принадлежит одновременно линиям OD и OE , поэтому

$$\xi_O = \xi_D = \sigma'/2k + \pi/4 + \gamma + 2\varphi; \quad (19)$$

$$\eta_O = \eta_E = \sigma'/2k - \pi/4 - \gamma + 2\psi. \quad (20)$$

С другой стороны, по (5) и (6)

$$\xi_O = \sigma_O/2k - \theta_O = \sigma_O/2k + \pi/4; \quad (21)$$

$$\eta_O = \sigma_O/2k + \theta_O = \sigma_O/2k - \pi/4. \quad (22)$$

Сравнивая (19) и (21), (20) и (22), получим:

$$\sigma_O = 2k(\sigma'/2k + 2\varphi + \gamma); \quad (23)$$

$$\sigma_O = 2k(\sigma'/2k + 2\psi - \gamma). \quad (24)$$

Приравнивая правые части равенств (23) и (24), получим связь между углами γ , φ и ψ :

$$\gamma = \psi - \varphi. \quad (25)$$

Равенство (25) связывает два неизвестных угла – φ и ψ , но для однозначного определения этих углов одного равенства недостаточно. Решением проблемы может стать то соображение, что точка O после построения области $CEOD$ должна оказаться на осевой линии полосы. Тогда процедура нахождения углов φ и ψ сведется к следующим шагам:

- 1) задаем произвольно угол φ ;
- 2) находим по (25) угол ψ ;
- 3) рассчитываем конфигурацию пластических областей ABC , ACD и BCE ;
- 4) численно рассчитываем конфигурацию области $CEOD$ и определяем положение точки O . В общем случае для произвольно заданного значения φ точка O не попадет на ось поло-

сы, поэтому после этого шага вновь повторяем всю последовательность действий (пп. 1 – 4) с другим углом φ . При некотором значении угла φ точка O попадет на ось полосы; это и есть искомое значение φ . Затем по (25) найдем значение угла ψ .

Рассмотрим более подробно построение пластической области $CEOD$. Зададим n – количество отрезков разбиения дуг CD и CE . В каждой точке разбиения найдем угол θ . Таким образом, мы получим совокупность значений угла θ на сторонах CD и CE , которую пронумеруем следующим образом:

$\theta(0, 0)$ – угол θ в точке C ;

$\theta(0, *)$ – углы θ на CD ;

$\theta(*, 0)$ – углы θ на CE ;

$\theta(0, n)$ – угол θ в точке D ;

$\theta(n, 0)$ – угол θ в точке E .

Затем определим координаты точек разбиения дуг CD и CE :

$x(0, 0), y(0, 0)$ – координаты точки C ;

$x(0, *), y(0, *)$ – координаты точек разбиения дуги CD ;

$x(*, 0), y(*, 0)$ – координаты точек разбиения дуги CE ;

$x(0, n), y(0, n)$ – координаты точки D ;

$x(n, 0), y(n, 0)$ – координаты точки E .

Для нахождения угла θ в каждой узловой точке области $CEOD$ воспользуемся первой теоремой Генки [3]:

$$\theta(i, j) = \theta(i, 0) + \theta(0, j) - \theta(0, 0).$$

Расчет будем проводить, начиная с точки $(1, 1)$.

Координаты узловых точек области $CEOD$ будем вычислять шаг за шагом. Пусть известны координаты узлов $(i-1, j)$, $(i, j-1)$ и угол θ в них. Положение точки (i, j) определяется пересечением малых дуг. Заменим последние хордами, наклон которых равен среднему значению наклонов в конечных точках. Дифференциальные уравнения линий скольжения (5) и (6) заменим разностными:

$$y(i, j) - y(i-1, j) = (x(i, j) - x(i-1, j))t_1; \quad (26)$$

$$y(i, j-1) - y(i, j) = -(x(i, j-1) - x(i, j))t_2, \quad (27)$$

где

$$t_1 = \operatorname{tg} \frac{1}{2}(\theta(i, j) + \theta(i-1, j)); \quad t_2 = \operatorname{ctg} \frac{1}{2}(\theta(i, j-1) + \theta(i, j)).$$

Разрешим уравнения (26) и (27) относительно $x(i, j)$ и $y(i, j)$:

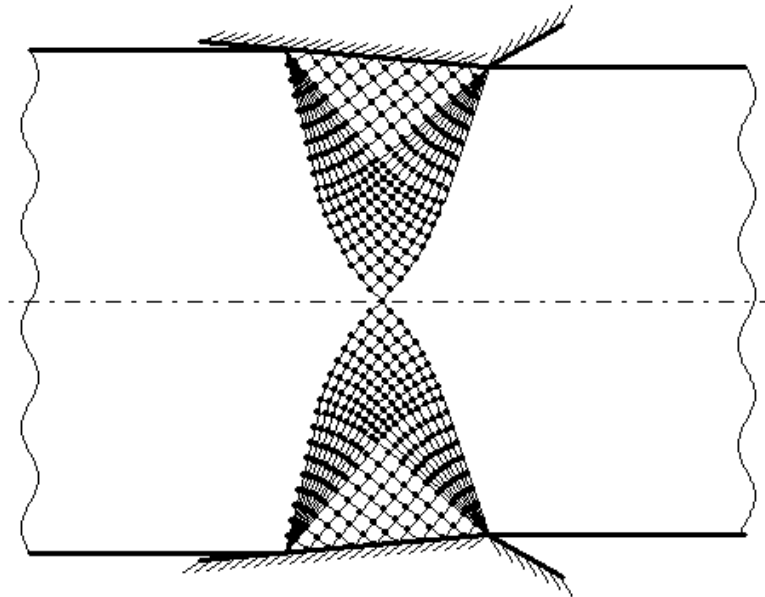
$$x(i, j) = [y(i, j-1) - y(i-1, j) + x(i-1, j)t_1 + x(i, j-1)t_2] / (t_1 + t_2); \quad (28)$$

$$y(i, j) = y(i-1, j) + (x(i, j) - x(i-1, j))t_1. \quad (29)$$

Соотношения (28) и (29) дают координаты всех узловых точек пластической области $CEOD$. Расчет ведется с узла $(1, 1)$. Узел (n, n) – это точка O .

Построенные поля линий скольжения для $\gamma = 5^\circ$ и $\gamma = 20^\circ$ приведены на рис. 2.

а)



б)

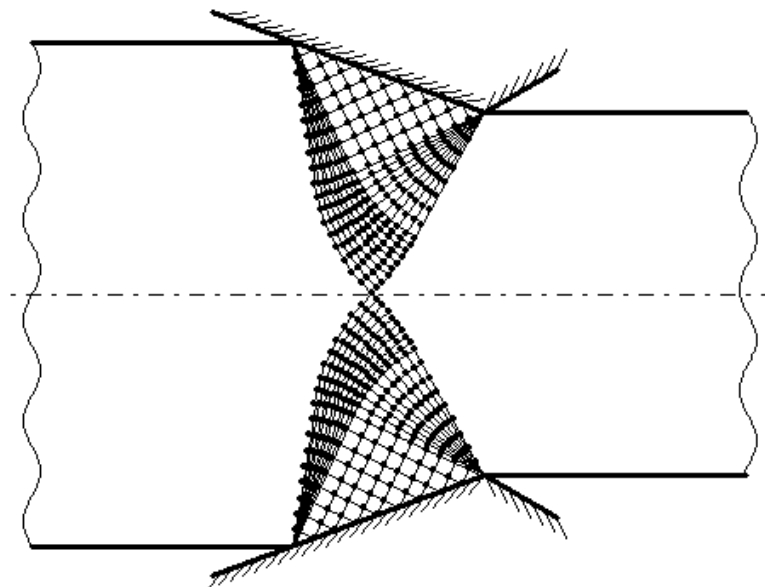


Рис. 2. Поля линий скольжения в задаче о волочении полосы:

а – для $\gamma = 5^\circ$; б – для $\gamma = 20^\circ$

Построение поля напряжений

При построении поля напряжений будем исходить из того, что слева от AOA' (см. рис. 1) на материал не действуют силы, поэтому сумма горизонтальных составляющих напряжений по сечению AOA' равна нулю. Тогда расчет поля напряжений во всей пластической области сведется к следующим этапам.

1) Задаем произвольно σ_o – нормальное напряжение в точке O . Поскольку $\theta_o = -\pi/4$, то по (5) $\xi_{ADO} = \sigma_o/2k - \theta_o$.

2) Находим суммы горизонтальных составляющих напряжений вдоль OD

$$l_i = \sqrt{(x(i, n) - x(i-1, n))^2 + (y(i, n) - y(i-1, n))^2}, \quad i \in [1; n];$$

$$\varphi_i = (\theta(i, n) + \theta(i-1, n))/2, \quad i \in [1; n];$$

$$k_{xi} = k \cos|\varphi_i|, \quad i \in [1; n];$$

$$k_{OD} = \sum_{i=1}^n l_i k_{xi};$$

$$\sigma_i = 2k(\xi_{ADO} + \varphi_i), \quad i \in [1; n];$$

$$\sigma_{xi} = \sigma_i \sin|\varphi_i|, \quad i \in [1; n];$$

$$\sigma_{OD} = \sum_{i=1}^n l_i \sigma_{xi}.$$

- 3) Находим суммы горизонтальных составляющих напряжений вдоль AD

$$\theta_{AD} = -\gamma - \pi/4 - \varphi; \quad k_{AD} = k|AD|\cos|\theta_{AD}|;$$

$$\sigma = 2k(\xi_{ADO} + \theta_{AD}); \quad \sigma_{AD} = \sigma|AD|\sin|\theta_{AD}|.$$

- 4) Находим суммы горизонтальных составляющих напряжений вдоль ADO

$$k_{ADO} = k_{OD} + k_{AD}; \quad \sigma_{ADO} = \sigma_{OD} + \sigma_{AD}.$$

- 5) Находим полную силу, действующую вдоль ADO в горизонтальном направлении

$$R = k_{ADO} + \sigma_{ADO}.$$

Эта сила должна быть равна нулю, но в общем случае для произвольно заданного значения σ_o она окажется отличной от нуля. Поэтому после этого шага вновь повторяем всю последовательность действий (пп. 1 – 5) с другим значением σ_o . При некотором значении σ_o сила R окажется равной нулю; это и есть искомое значение σ_o .

- 6) Определяем распределение напряжений в области ABC

$$\xi_{ADO} = \sigma_o/2k - \theta_o; \quad \theta_{AD} = -\gamma - \pi/4 - \varphi;$$

$$\sigma_{AD} = 2k(\xi_{ADO} + \theta_{AD});$$

$$\eta_{ACD} = \sigma_{AD}/2k + \theta_{AD};$$

$$\theta_{ABC} = -\gamma - \pi/4;$$

$$\sigma_{ABC} = 2k(\eta_{ACD} - \theta_{ABC}).$$

- 7) Определяем распределение напряжений в области ACD

$$\sigma_{CD0} = \sigma_C = \sigma_{ABC};$$

$$\sigma_{CDi} = 2k(\eta_{ACD} - \theta(0, i)), \quad i \in [1; n].$$

Поскольку α -линии области ACD прямолинейны, то на i -й α -линии $\sigma_i = \sigma_{CDi}$.

- 8) Определяем распределение напряжений в области BCE

$$\xi_{BCE} = \sigma_{ABC}/2k - \theta_{ABC};$$

$$\sigma_{CE0} = \sigma_C = \sigma_{ABC};$$

$$\sigma_{CEi} = 2k(\xi_{BCE} + \theta(i, 0)), \quad i \in [1; n].$$

Поскольку β -линии области BCE прямолинейны, то на i -й β -линии $\sigma_i = \sigma_{CEi}$.

- 9) Определяем распределение напряжений в области $CEOD$

$$\sigma_{CEOD}(0, 0) = \sigma_C = \sigma_{ABC};$$

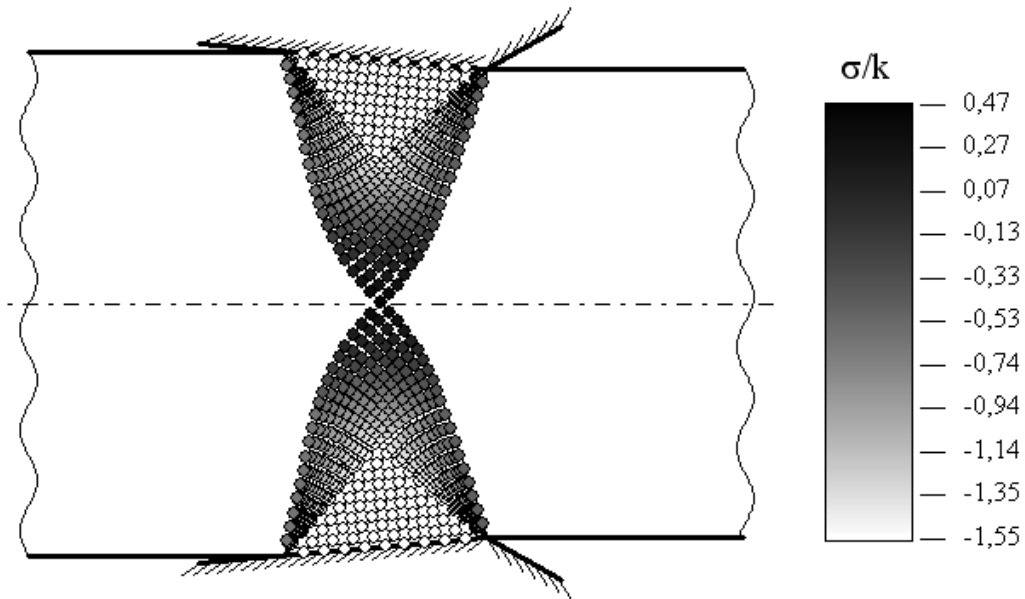
$$\sigma_{CEOD}(0, i) = \sigma_{CDi}, \quad \sigma_{CEOD}(i, 0) = \sigma_{CEi}, \quad i \in [1; n].$$

Напряжения во всех остальных точках области $CEOD$ находим по первой теореме Генки [3]:

$$\sigma_{CEOD}(i, j) = \sigma_{CEOD}(i, 0) + \sigma_{CEOD}(0, j) - \sigma_{CEOD}(0, 0), \quad i, j \in [1; n].$$

Построенные поля напряжений для $\gamma = 5^\circ$ и $\gamma = 20^\circ$ приведены на рис. 3.

а)



б)

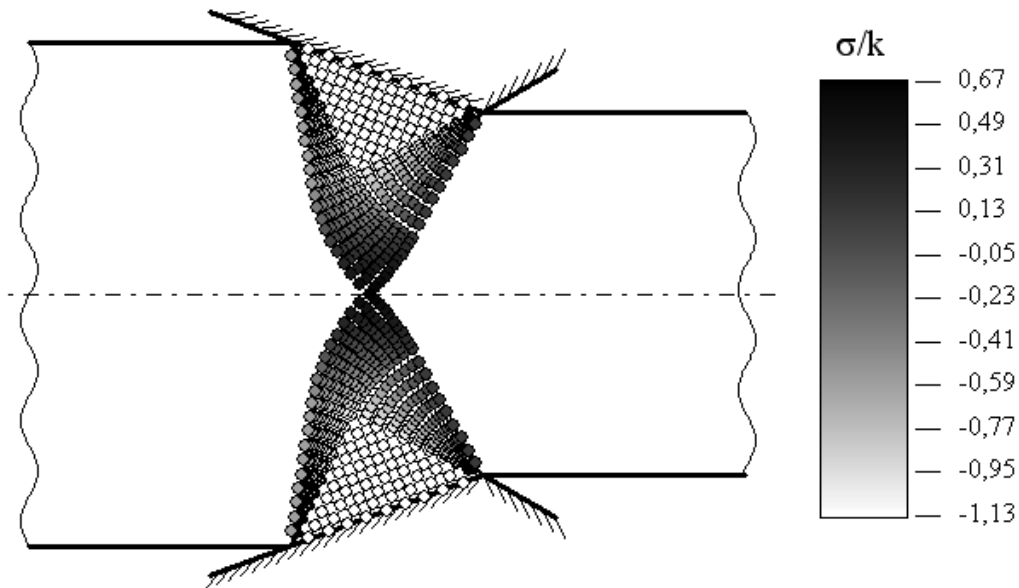


Рис. 3. Поля напряжений в задаче о волочении полосы:

а – для $\gamma = 5^\circ$; б – для $\gamma = 20^\circ$

Построение поля скоростей

Рассмотрим построение поля скоростей в области $CEOD$. Из условия непрерывности нормальной составляющей скорости на линиях OD и OE получим:

– в точке O , в которой $\theta_o = -\pi/4$,

$$u_o = u(n, n) = U \cos|\theta_o|, \quad v_o = v(n, n) = V \sin|\theta_o|;$$

– на линии OD

$$v(i, n) = V \sin|\theta(i, n)|, \quad i \in [n-1; 0];$$

– на линии OE

$$u(n, i) = U \cos|\theta(n, i)|, \quad i \in [n-1; 0].$$

Составляющие скорости $u(i, n)$ на OD , $v(n, i)$ на OE получим из (7) и (8), заменив дифференциальные уравнения разностными:

$$u(i, n) = u(i+1, n) - \frac{1}{2}(v(i+1, n) + v(i, n))(\theta(i+1, n) - \theta(i, n)), \quad i \in [n-1; 0];$$

$$v(n, i) = v(n, i+1) - \frac{1}{2}(u(n, i) + u(n, i+1))(\theta(n, i) - \theta(n, i+1)), \quad i \in [n-1; 0].$$

Таким образом, на границах OD и OE известны обе составляющие скорости. Конечно-разностные соотношения для расчета скоростей во внутренних точках области $CEOD$ получим также из (7) и (8):

$$v(i, j) = \frac{1}{1/2 t_1 t_2 - 2} \left(u(i+1, j) t_2 - \frac{1}{2} v(i+1, j) t_1 t_2 - 2v(i, j+1) + u(i, j+1) t_2 \right),$$

$$u(i, j) = u(i+1, j) - \frac{1}{2}(v(i+1, j) + v(i, j)) t_1, \quad i, j \in [n-1; 0],$$

где

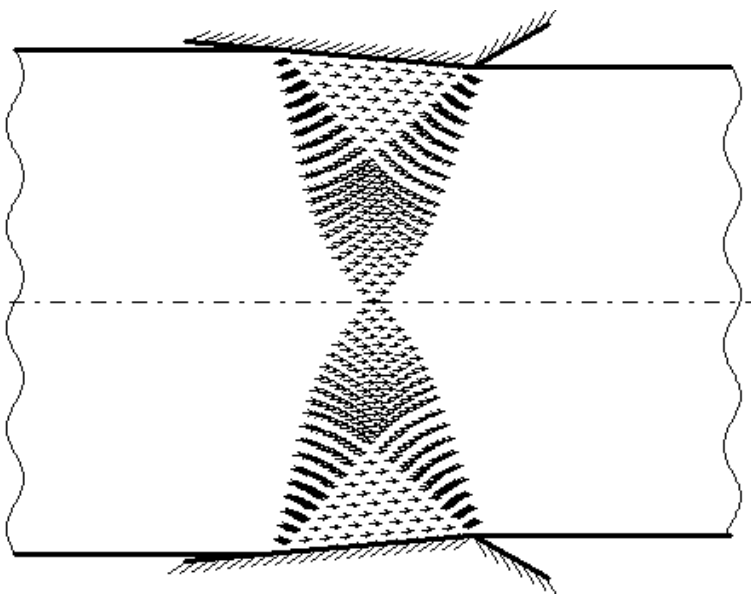
$$t_1 = \theta(i+1, j) - \theta(i, j), \quad t_2 = \theta(i, j) - \theta(i, j+1).$$

Перейдем к областям ACD и BCE . Значения составляющих скорости на i -й α -линии области ACD равны соответственно $u(0, i)$, $v(0, i)$, $i \in [0; n]$. Аналогично, значения составляющих скорости на i -й β -линии области BCE равны соответственно $u(i, 0)$, $v(i, 0)$, $i \in [0; n]$.

В области ABC – равномерное поле скоростей $u_{ABC} = u(0, 0)$, $v_{ABC} = v(0, 0)$. Необходимым условием правильности построенного поля скоростей является то, что материал в области ABC должен двигаться вдоль линии контакта AB .

Построенные поля скоростей для $\gamma = 5^\circ$ и $\gamma = 20^\circ$ приведены на рис. 4. Каждая стрелочка представляет собой вектор скорости в соответствующей точке пространства.

а)



б)

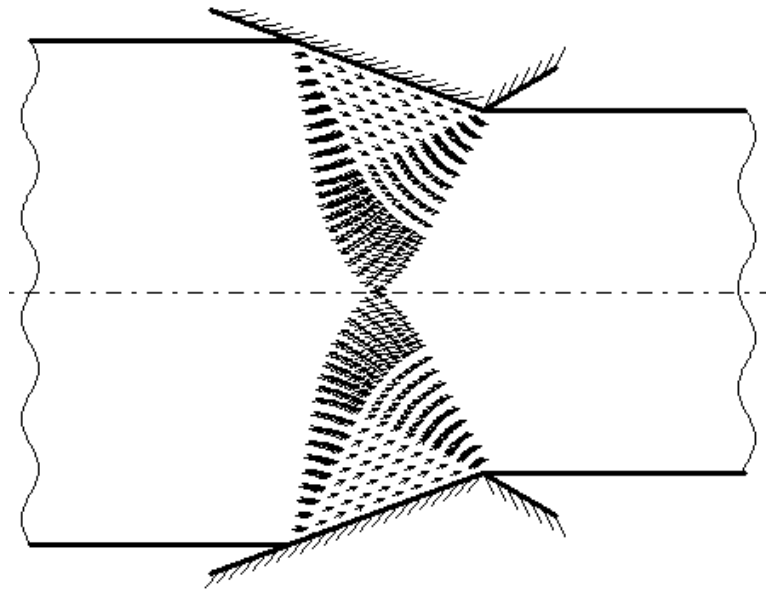


Рис. 4. Поля скоростей в задаче о волочении полосы:

а – для $\gamma = 5^\circ$; б – для $\gamma = 20^\circ$

Краткие выводы

Таким образом, в работе рассмотрена задача о волочении полосы в рамках теории плоской деформации с использованием модели жесткопластического тела. Построены поля линий скольжения, напряжений, скоростей. Дана наглядная графическая интерпретация полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Гостехиздат, 1969. – 420 с.
2. Лошманов, А. Ю. Математическое описание полей деформаций в некоторых задачах обработки металлов давлением / А. Ю. Лошманов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 10-15.
3. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / пер. с англ. Э. И. Григолюка. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 408 с.
4. Хромов, А. И. Деформация и разрушение жесткопластических тел / А. И. Хромов. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 181 с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

Мокрицкий Б. Я., Петров В. В., Высоцкий В. В., Артёменко А. В.
B. Y. Mokritsky, V. V. Petrov, V. V. Vysotsky, A. V. Artemenko

СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

LOADING PATTERNS AND METHODS FOR ASSESSING THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND THE OPERATING PERFORMANCE OF TOOL MATERIALS

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: boris@knastu.ru.
Mr. Mr. Boris Ya. Mokritskij – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology, Senior Research Fellow at Komsomolsk-on-Amur Technical University. E-mail: boris@knastu.ru.

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.
Mr. Viktor V. Petrov – Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.

Высоцкий Владимир Валентинович – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.
Mr. Vladimir V. Vysotsky – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.

Артёменко Алексей Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.
Mr. Alexey V. Artemenko – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.

Аннотация. Работоспособность инструмента в заданных условиях эксплуатации можно оценивать без натурных испытаний. Для этого необходимо создать условия нагружения, близкие к реальным, и оценить способность инструментального материала сопротивляться преобладающему механизму разрушения за счёт контроля физико-механических характеристик, информативно отражающих эксплуатационные свойства.

Summary. The efficiency of the tool in its target environment can be assessed without carrying out full-scale tests. To do this you need to create loading conditions that are close to reality, and to assess the ability of the tool material to resist the prevailing fracture process, by way of controlling its physical and mechanical properties that bring out factual information about its performance characteristics.

Ключевые слова: трещиностойкость материала, работоспособность инструмента.

Key words: fracture toughness, tool performance.

УДК 621.9

Введение

Физические методы исследования характеристик инструментального материала при правильно выбранной схеме нагружения позволяют адекватно оценивать эксплуатационные свойства инструмента при тех или иных условиях его эксплуатации [1]. Ниже приведены отдельные сведения о назначении тех или иных схем нагружения и полученных результатах оценки эксплуатационных свойств по физико-механическим параметрам инструментального материала.

Общие сведения о методах исследования

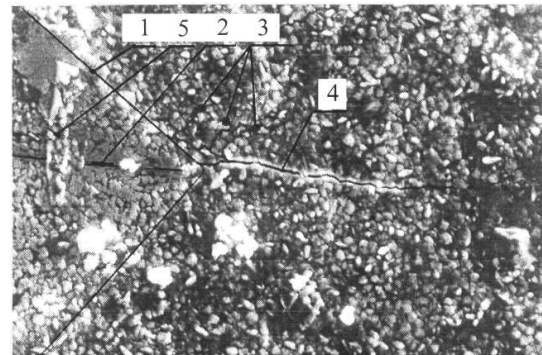
Были использованы [2] результаты микрофрактографических исследований, результаты оценки свойств инструментальных материалов методом внутреннего трения, экзоэлектронной эмиссии и акустической эмиссии.

Возможность применения индентирования для нагружения инструментального материала с целью оценки качества металлорежущего инструмента обоснована в работе [1]. Там же показано, что такая модель нагружения вполне адекватна и даёт достаточно точные результаты прогнозирования работоспособности инструмента.

В качестве примера на рис. 1 показано фото для случая инициирования образования и роста трещины в покрытии из угла отпечатка индентора в виде пирамидки.

Рис. 1. Картина разрушения образца с покрытием при внедрении алмазной пирамиды с малым усилием:

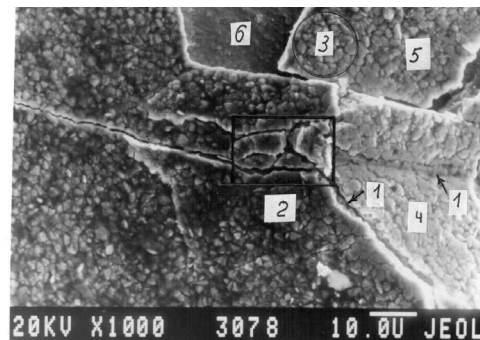
1 – контур отпечатка пирамиды; 2 – контур отпечатка перемычки пирамиды; 3 – развитая сетка малых трещин; 4 – магистральная трещина; 5 – отслоившийся объем покрытия



Более детально это представлено на рис. 2. Приведённые фото показывают, сколь сложно происходит разрушение инструментального материала при индентировании и в реальных условиях эксплуатации, позволяют отметить их сходство и различия. Однако такого качественного анализа недостаточно, необходимы количественные критерии сравнения. Это приведено далее.

Рис. 2. Детализация разрушения покрытия (фрагмент рис. 1):

1 – след грани индентора; 2 – зона развитого трещинообразования; 3 – сетка мелких трещин; 4 – вдавленное покрытие с сеткой мелких трещин; 5 – сколовшийся участок основы после скола покрытия; 6 – инструментальная основа



Используемые методики и методологии

Параметр Q^{-1} внутреннего трения рассчитывали по известной [3] формуле

$$Q^{-1} = \lambda \cdot \alpha / \pi,$$

где λ – длина возбуждающего импульса; α – коэффициент затухания. Установлено, что фон внутреннего трения (как характеристика способности материала диссипировать подводимую энергию):

- в сплавах группы ВК больше, чем в сплавах группы ТК;
- в сплавах группы ТК уменьшается с увеличением содержания карбидной фазы TiC,
- в сплавах группы ВК фон внутреннего трения линейно растёт с увеличением содержания кобальта.

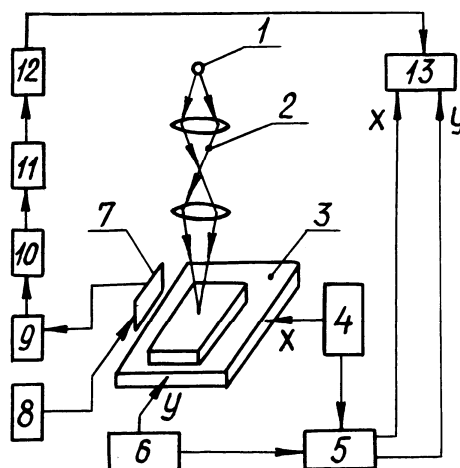
Методология применения экзоэлектронной эмиссии (далее ЭЭЭ) состоит в том, что он является одним из физических методов исследования и неразрушающего контроля поверх-

ностных слоев (глубиной примерно 10^4 нм), когда носителями информации об энергетическом состоянии и способности аккумулировать энергию внешнего воздействия являются электроны, имитированные с возбужденного поверхностного слоя материалов. Возможности метода ЭЭЭ при решении задач неразрушающего контроля базируются на взаимосвязи эмиссионных параметров с дефектностью материалов, а именно на зависимости интенсивности и кинетики ЭЭЭ от степени деформации и напряженного состояния материалов, зависимости ЭЭЭ от вида нагружения, от типа и концентрации поверхностных дефектов.

Для решаемых задач использована установка, работающая по методу сканирующего светового зонда. Её принципиальная схема приведена на рис. 3, более подробное описание дано в работе [4].

Рис. 3. Принципиальная схема установки регистрации экзоэлектронной эмиссии:

- 1 – источник света;
- 2 – оптическая система;
- 3 – двухкоординатный предметный столик;
- 4 и 6 – электромеханический привод с датчиками перемещения;
- 5 – блок управления;
- 7 – умножитель электронов;
- 8 – блок питания;
- 9 – предварительный усилитель;
- 10 – дискриминатор;
- 11 – усилитель;
- 12 – интенсиметр;
- 13 – регистратор



Пример использования метода ЭЭЭ для оценки состояния поверхности показан на примере рис. 4, где представлены записи интенсивности ЭЭЭ на образце с хорошим состоянием поверхности покрытия (см. рис. 4, а) и с наличием трех поперечных трещин в покрытии. Этим трещинам соответствуют пики интенсивности ЭЭЭ на рис. 4, б. Отметим, что ширина указанных трещин не превышала 0,3 мкм.

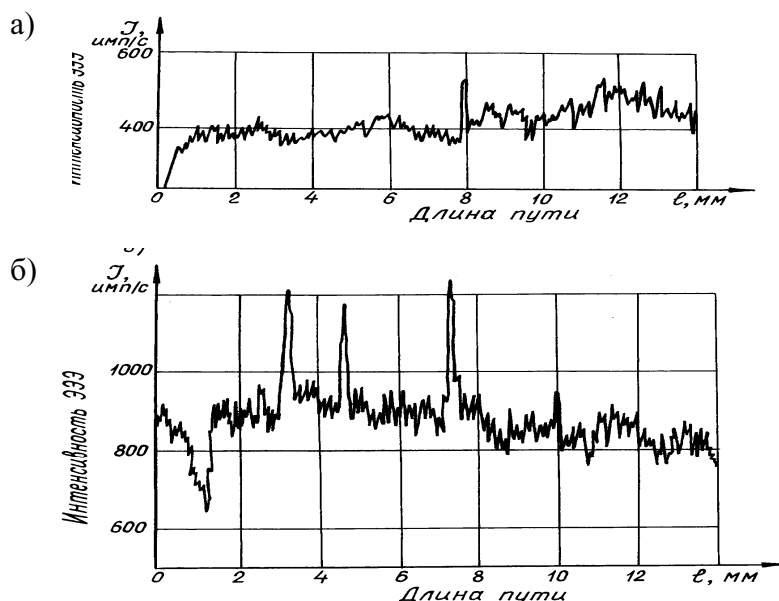


Рис. 4. Примеры записи интенсивности экзоэлектронной эмиссии с поверхности покрытия инструмента: а – сплав МС2216 с хорошим состоянием покрытия; б – сплав МС1116 с наличием трещин на поверхности

Применение метода акустической эмиссии оказалось предпочтительным в связи с его высокой чувствительностью, возможностью обнаруживать и следить за поведением развивающихся дефектов. Для оценки термостойкости контролируемого инструментального материала определяли пороговое значение плотности энергии лазерного импульса E_c . Пороговое значение – это такое значение плотности энергии, при котором начинается интенсивный процесс трещинообразования на поверхности образца.

Принципиальная схема установки для реализации метода оценки термостойкости показана на рис. 5.

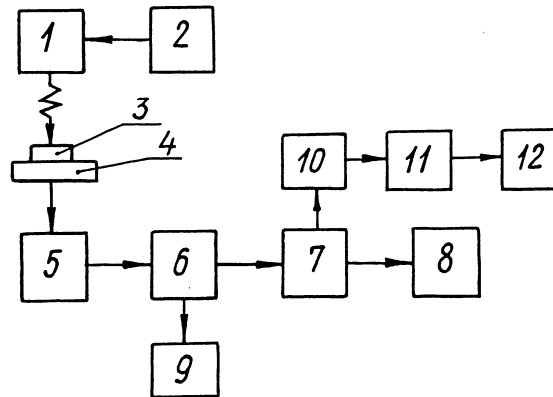


Рис.5. Блок-схема оценки термостойкости инструментальных материалов лазерно-акустическим методом:

1 – квантовый генератор; 2 – модулятор; 3 – образец; 4 – измерительный столик;
5 – предусилитель; 6 – усилитель; 7 – дискриминатор-формирователь; 8 – интенсиметр;
9 – осциллограф; 10 – счетчик; 11 – транскриптор; 12 – цифropечатающее устройство.

Пример одновременной записи изменения мощности лазерного воздействия на изделие и регистрации соответствующего акустического «отклика» инструментального материала показан на рис. 6.

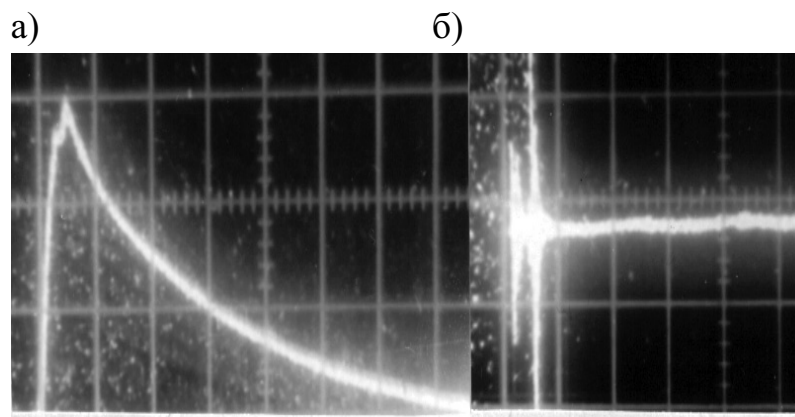


Рис. 6. Пример одноактного воздействия лучом лазера на покрытие инструмента:
а – изменение во времени мощности лазерного излучения; б – синхронное изменение суммарного счета сигналов АЭ при воздействии луча на образец

Для определения порогового значения плотности лазерного импульса строили график зависимости суммарного счета N_{Σ} импульсов акустической эмиссии за время импульса от плотности энергии лазерного импульса (или температуры нагрева образца). За пороговое значение принималось такое значение плотности энергии импульса E , когда зависимость суммарного счета N_{Σ} от плотности энергии E резко отклоняется от прямолинейного закона. Пример [2] такого графика для отдельных инструментальных материалов приведен на рис. 7.

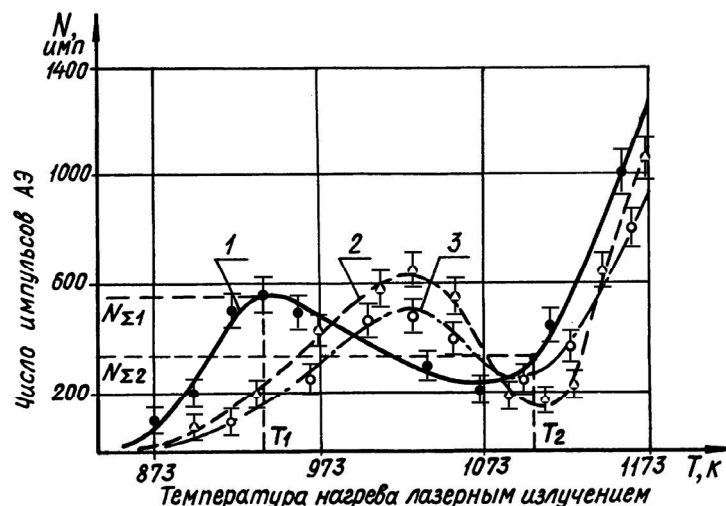


Рис. 7. Температурная зависимость [2] числа сигналов акустической эмиссии при воздействии лучом лазера:

1 – VK8; 2 – VK8 + TiN; 3 – VK8 + Ti + TiN

Из рисунка следует, что практически при одном уровне сигналов акустической эмиссии пик акустической эмиссии для инструмента с покрытием смещается в область более высоких температур, т.е. покрытия повышают термостойкость инструмента за счет большей термостойкости материала покрытия.

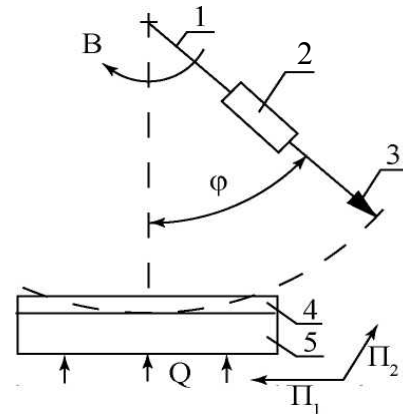
Результаты и их обсуждение

Анализ представленных выше результатов позволяет считать условия разрушения покрытия при резании и при испытаниях путем внедрения индентора сопоставимыми. На этом основана методология инденторно-акустического метода контроля трещиностойкости и качества сцепления покрытия с основой. В ней положено, что при внедрении индентора возникают локальные напряжения сжатия, сдвига и отрыва. Все эти акты сопровождаются акустическими сигналами. Задачей оценки является регистрация и анализ параметров акустической эмиссии. При этом важно установить, какая величина параметров акустической эмиссии свидетельствует о наличии актов трещинообразования и какие именно параметры ответственны за качество сцепления покрытия с основой. Разделение информации о трещинообразовании и об отслоении от покрытия обеспечивается, например, технологическим приемом выдержки индентора под нагрузкой [2]. Этот прием позволяет производить сравнительный контроль образцов между собой и может быть использован как аттестационный или отбраковочный при наличии эталонного образца. В частности, метод акустической эмиссии может быть использован как комплексный метод оценки свойств инструментальных материалов. Сравнение [5] этого метода с другими методами оперативной экспрессной оценки свойств инструментального материала, например, с методом оценки коэрцитивной силы, свидетельствует в пользу метода акустической эмиссии.

Метод [6] разработан для экспрессной оперативной оценки качества сцепления покрытия с основой у разных инструментальных материалов для выбора того материала, у которого по параметрам акустической эмиссии прогнозируется лучшее качество сцепления. Метод разработан потому, что часто (при разработке новых материалов, при анализе результатов и т.д.) важно знать не саму величину прочности сцепления, а сравнительный результат (лучше или хуже, чем у такого-то материала) оценки качества. Данный метод можно реализовать различными технологическими приемами. Наиболее информативен, технологичен и прост метод маятниково-акустического скрайбирования, где перемещение индентора в материале образца осуществляется по дуге с одновременной регистрацией параметров акустической эмиссии. Одна из схем реализации такого метода показана на рис. 8.

Рис. 8. Принципиальная схема устройства для маятниково-акустического скрайбирования:

1 – маятник; 2 – устройство регулирования массы маятника; 3 – индентор; 4 – покрытие; 5 – основа инструментального материала; П – перемещения столика с образцом; Q – подвод тепла



Один из примеров действующей системы, на которой реализована такая принципиальная схема устройства для маятниково-акустического метода, показан на рис. 9.



Рис. 9. Общий вид экспериментальной установки для маятниково-акустического скрайбирования

Оценку трещиностойкости инструментального материала наиболее просто выполнять путём сравнения испытываемого образца с эталоном. Так, в решении [7] брали в качестве эталона инструмент, работоспособность которого известна и условно принимали его трещиностойкость за базовую величину [8], например, за единицу. Затем брали исследуемый инструмент для оценки его трещиностойкости (и, следовательно, работоспособности) в сравнении с эталоном. Эталон нагружали индентором твердомера и регистрировали суммарный счёт N_1 сигналов акустической эмиссии. Затем в аналогичных условиях нагружали исследуемый инструмент и регистрировали соответствующее N_2 число сигналов акустической эмиссии. Вычисляли отношение N_2 к N_1 и по величине этого отношения судили о трещиностойкости исследуемого инструмента исходя из положения: чем меньше это отношение, тем выше сопротивляемость материала инструмента образованию и росту трещин. Физический смысл этого состоит в следующей посылке: чем меньше суммарный счёт N_2 у исследуемого образца, тем меньше событий в нём произошло за время нагружения. Наиболее вероятные события – это образования трещин или этапы роста трещин. Если их меньше в испытываемом образце, чем в эталоне, следовательно, от образца можно ожидать более высокой работоспособности за счёт лучшей сопротивляемости образованию и росту трещин. Данное решение не может обеспечить высокой точности контроля качества инструмента, но оно удобно для сортировки и отбраковки инструмента.

Точность оценки качества инструмента повышена в решении [9] за счет возможности статистической обработки результатов и разделения сигналов АЭ в амплитудный спектр. Контролируемое тело нагружали индентором, принимали сигналы акустической эмиссии, образующиеся при внедрении индентора, и выполняли их амплитудный анализ на амплитудном анализаторе, т.е. получали спектр сигналов акустической эмиссии. Трещиностойкость определяли по безразмерной величине

$$T = (1 - n/N) \cdot \sum_{i=1}^N N_i / (N \cdot N_n),$$

где n – номер канала с максимальным числом сигналов акустической эмиссии; N – число каналов амплитудного анализатора; N_i – число сигналов в i -м канале анализатора; N_n – число сигналов в n -м канале анализатора, т.е. максимальное число сигналов в каналах анализатора. Чем ближе величина T к единице, тем выше трещиностойкость контролируемого изделия.

Результаты контроля качества инструмента указанными методами [10, 11] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставительные результаты контроля качества инструмента при оценке его трещиностойкости по параметрам акустической эмиссии

Контролируемый инструмент	Порядковый номер инструмента в ряду по периоду стойкости в конкретных условиях эксплуатации	Порядковый номер инструмента в ряду по параметру N_2/N_1 в решении [8]	Порядковый номер инструмента в ряду по параметру T в решении [9]
T15K6	7	6	7
T15K6+TiN	6	7	6
BK6	5	5	5
BK6+TiN	4	4	4
BK6+Ti+TiN+Ti	3	3	3
BK6+TiN+TiCN+Al2O3	2	1	2
BK6+TiC+Ti+TiN+Zr+ZrN	1	2	1

Примечание: приведены результаты трех испытаний в каждом случае

Из данных табл. 1 видно, что метод экспрессной оценки [8] в двух случаях дал неточные результаты по отношению к натурным испытаниям при резании. Метод [9] учёта сигналов по каждому из пороговых сигналов показал полную идентичность эксперименту при резании.

Расширение возможностей оценки трещиностойкости инструментальных материалов может быть достигнуто за счет обеспечения поступательного перемещения индентора вдоль тела образца. Сущность способа состоит в следующем. В образец внедряют индентор клинообразной (конусообразной) формы и сообщают ему перемещение. Затем индентор смещают относительно траектории первоначального перемещения, аналогичным образом нагружают и перемещают на такой же путь. О качестве сцепления покрытия с основой судят по приросту суммарного счета сигналов АЭ при повторном нагружении, отнесенному к величине смещения. Способ [10] осуществляли следующим образом. Брели плоские образцы с покрытием. В покрытие внедряли индентор и вели запись суммарного счета сигналов АЭ. Перемещали образец (со скоростью 15 мм/мин) на некоторое (порядка 20 мм) расстояние. Перемещение прекращали и регистрировали величину N_1 суммарного счета. Выводили индентор, смещали его в сторону на некоторое (0,5; 1; 1,5; 2 мм) расстояние l . Вновь внедряли индентор на ту же глубину и перемещали на то же расстояние с такой же скоростью. Прекращали перемещение и регистрировали величину N_2 суммарного счета сигналов АЭ. Величина N_2 оказывалась больше N_1 из-за наличия актов сдвига и скола покрытия между следами скрайбирования индентора под действием касательных напряжений. Величина прироста $\Delta N = N_2 - N_1$



тем больше, чем меньше величина l смещения при повторном нагружении (и, следовательно, больше сколов покрытия). Трещиностойкость оценивали по отношению

$$T = \frac{\Delta N}{l} = \frac{N_2 - N_1}{l}.$$

Сопоставляя различные образцы по величине T , судили о трещиностойкости покрытия полагая, что чем больше величина T , тем ниже трещиностойкость, так как при постоянной величине l смещения большая величина прироста ΔN суммарного счета сигналов АЭ свидетельствует о возникновении большего количества трещин и сколов.

В ряде случаев образцы могут быть выполнены в форме цилиндра и иметь на различных участках различные покрытия. Нагружение после поджатия индентора к образцу осуществляют [11] вращением образца. В остальном методика аналогична описанной выше.

В решении [12] использована схема нагружения индентором при плоско-параллельном перемещении образца. Фактически эта схема нагружения идентична схеме истирания покрытия (до его отслоения от основы путём шелушения). При задании образцу возвратно-поступательного движения осуществлена регистрация сигналов акустической эмиссии. Взаимодействие индентора и образца под некоторой нагрузкой вызывало регистрацию во времени сигналов АЭ определённой интенсивности. Затем образец относительно индентора перемещали с некоторой скоростью на некоторое расстояние. Затем, не изменяя нагрузки и скорости, образец на ту же длину перемещали в обратном направлении. Критерием оценки качества инструмента в таких условиях нагружения принято время до момента резкого роста интенсивности сигналов акустической эмиссии. Результаты оценки качества инструмента проверяли, сравнивая их с результатами оценки по классическому методу (сдвиг покрытия). Для этого брали некоторое количество образцов, нумеровали их и испытывали по классическому и по предложенному [13] методу. Образцы по результатам испытаний выстраивали в рандомметрические ряды и оценивали погрешность их расположения в ряду в сравнении с классическим методом (см. табл. 2).

Таблица 2

Последовательность расположения номеров образцов по возрастанию качества сцепления покрытия с основой

При оценке по классическому методу	При оценке по предложенному [11] методу		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	2	3	4
2	2	2	2
8	8	8	8
4	4	6	4
6	10	4	6
10	6	10	9
9	9	9	10
12	12	12	12
11	1	11	11
1	11	1	1
7	7	7	7
5	5	5	5
3	3	3	3

Приведённые в табл. 2 данные отличаются по вариантам нагружения, а именно: вариант 1 – нагрузка на индентор 40 кгс, скорость перемещения образца 30 мм/мин на расстояние 20 мм; вариант 2 – нагрузка на индентор 40 кгс, скорость перемещения образца 30 мм/мин на расстояние 40 мм; вариант 3 – нагрузка на индентор 40 кгс, скорость перемещения образца 30 мм/мин на расстояние 20 мм; вариант 2 – нагрузка на индентор 28 кгс, скорость перемещения образца 10 мм/мин на расстояние 20 мм.

Последовательность расположения образцов в порядке (графа 1 табл. 3) возрастания их качества, полученную при оценке по классическому методу, принимали за базу. Остальные полученные результаты сравнивали с этим базовым вариантом и определяли количество полученных отклонений.

Выводы

1. Разработаны установки и методы, позволяющие оценить параметры сопротивляемости инструментальных материалов разрушению, которые могут быть использованы для оперативного качественного и количественного контроля качества, оценки состояния, диагностирования и прогнозирования работоспособности инструмента. Методы ориентированы на применение неразрушающего воздействия и экспрессную методику.

2. В разработанных методах установлена связь информативных параметров с физическими процессами разрушения инструментальных материалов, что обеспечивает оценку (качественный и количественный контроль) таких параметров как трещиностойкость, сцепление покрытия с основой. Введены соответствующие критерии их оценки по информативным параметрам внутреннего трения, экзоэлектронной или акустической эмиссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокрицкий, Б. Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путём управления свойствами инструментального материала : моногр. /Б. Я. Мокрицкий. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 232 с.
2. Современные методы конструирования, контроля качества и прогнозирования работоспособности режущего инструмента / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, Н. А. Семашко, С. П. Тараев. – Владивосток: ДВГУ, 1990. – 122 с.
3. Постников, В. С. Внутреннее трение в металлах / В.С. Постников. –М.: Металлургия, 1969. – 329 с.
4. Кортон, В. С. Методологические основы изучения экзоэлектронной эмиссии / В. С. Кортон // Техника и методика измерения экзоэлектронной эмиссии. – Свердловск: УПИ, 1973. – С.7-17.
5. Метод оценки свойств инструментальных материалов и диагностики работоспособности режущего инструмента / Б. Я. Мокрицкий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – № 9. – 2010. – С. 41-44.
6. А.с. СССР №1382175. Способ определения качества сцепления покрытия с основой / Н. А. Семашко, Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, С. П. Тараев. Оpubл.27.01.2010. Бюл. № 3.
7. А.с. СССР № 1522913. Способ акустического контроля трещиностойкости изделий / Ю. Г. Кабалдин, Н. А. Семашко, Б. Я. Мокрицкий, С. П. Тараев, В. В. Селезнёв. Оpubл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
8. Мокрицкий, Б. Я. Методология нетрадиционного комплексного подхода к решению проблемы повышения работоспособности металлорежущего инструмента / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Бурков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 31-41.
9. А.с. СССР № 1711569. Способ оценки трещиностойкости покрытий / Б. Я. Мокрицкий, В. А. Сергеев, В. Н. Медакин, Н. И. Южаков. Оpubл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
10. А.с. СССР № 1752060. Способ динамической оценки качества сцепления покрытия с подложкой / Б. Я. Мокрицкий, В. Н. Медакин, В. А. Сергеев, В. М. Шанин. Оpubл.27.01.2010. Бюл. № 3.
11. А.с. СССР № 1711568. Способ оценки трещиностойкости покрытия / Б. Я. Мокрицкий, В. Н. Медакин, В. А. Сергеев, Ю. К. Алексеев. Оpubл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
12. А.с. СССР № 1752059. Способ динамической оценки качества сцепления покрытия с подложкой / Б. Я. Мокрицкий, В. Н. Медакин, В. А. Сергеев, В. М. Шанин. Оpubл.27.01.2010. Бюл. № 3.



Шишкин С. Б., Шишкин Б. В.
S.B.Shishkin, B.V.Shishkin

СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

SYSTEMATIC INACCURACY IN ANGLE MEASUREMENT INSTRUMENTS

Шишкин Сергей Борисович – магистр техники и технологии. E-mail: usu@knastu.ru
Mr. Sergey B. Shishkin – Master of Engineering and Technology. E-mail: usu@knastu.ru

Шишкин Борис Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: usu@knastu.ru
Mr. Boris V. Shishkin – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Chemical Production Machinery and Equipment. Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: usu@knastu.ru

Аннотация. Представлена математическая модель погрешности углоизмерительного оборудования, вызванной неперпендикулярностью оси вращения тахеометра к плоскости призмы. Проведенные экспериментальные исследования показали постоянный характер изменения погрешности, что соответствует разработанной математической модели.

Summary. The paper offers a mathematical model of inaccuracy of angle measurement instruments, caused by out-of-squareness of the rotation axis of a tachymeter in relation to the x-y plane of a prism. Experiments have shown that the change of error has a constant nature, which corresponds to the mathematical model.

Ключевые слова: углоизмерительное оборудование, погрешность, модель.

Key words: angle measurement instrument, inaccuracy, model.

УДК 53.089

Как показали исследования, погрешность углоизмерительного оборудования типа «TPSSystem-призма» определяется несколькими источниками [1]. Среди них наиболее существенным является погрешность, вызванная неперпендикулярностью оси вращения тахеометра к плоскости призмы.

Рассмотрим построение математической модели для анализа представленной погрешности. При проведении экспериментальных исследований по проверке модели на адекватность с использованием углоизмерительного оборудования плоскость двадцатичетырехгранной призмы была предварительно отгоризонтирована, что позволяет принять ее за плоскость горизонта. Во встроенном в прибор «TPSSystem-призма» уровне эта зависимость определяется по двум углам.

На рис. 1 показано положение тахеометра в системе координат XZY. За плоскость горизонта принята плоскость XOY. Положение плоскости вращения тахеометра задано тремя точками 1, 2 и 3. Точки определяются координатами: 1(0;0;0); 2(0;R;Rtg α); 3(R;0;Rtg β). За R принято расстояние от проекций точек 1 и 2 на плоскость XOY до начала координат (точка O). Расстояние R является радиусом шкалы тахеометра. Уровень тахеометра определяет наклон плоскости вращения тахеометра к плоскостям ZOY и ZOX в системе координат XZY с учетом принятого допущения о плоскости горизонта. На рис. 1 угол α определяет угол наклона прямой, получаемой пересечением плоскости вращения тахеометра 123 и плоскости ZOY к плоскости горизонта XOY. Угол β – угол наклона прямой, получаемой пересечением плоскости вращения тахеометра 123 и плоскости ZOX, к плоскости горизонта XOY. Угол φ – угол наклона плоскости вращения тахеометра 123 к плоскости горизонта XOY.

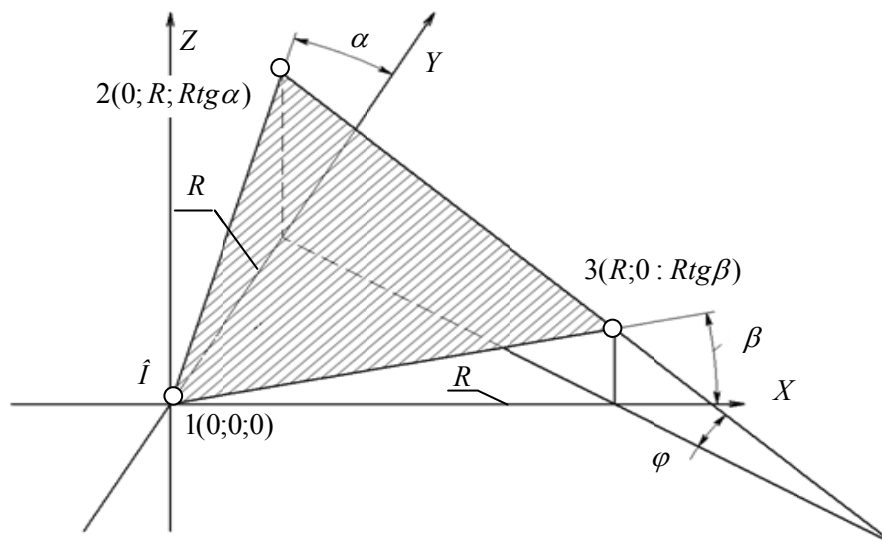


Рис. 1. Схема вращения тахеометра в системе координат

Величину угла φ получим, решив матрицу:

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix} = 0$$

Здесь x_i, y_i, z_i – координаты соответствующих точек.

После преобразований получим уравнение плоскости вращения тахеометра 123:

$$xR^2 \operatorname{tg} \beta + yR^2 \operatorname{tg} \alpha - zR^2 = 0$$

Общий вид уравнения для определения угла между плоскостями 123 и XOY:

$$\cos \varphi = (A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2) / (\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}),$$

где A_i, B_i, C_i – коэффициенты уравнений, определяющих плоскости 123 и XOY.

Согласно принятым обозначениям на рис. 1 для плоскости XOY имеем $A_1 = A_2 = 0$. Оставшиеся значения коэффициентов используем из уравнения плоскости вращения тахеометра 123. После упрощения выражение, определяющее угол наклона φ плоскости вращения тахеометра к плоскости горизонта, примет вид:

$$\varphi = \arccos \left(1 / \sqrt{R^4 \operatorname{tg}^2 \beta + R^4 \operatorname{tg}^2 \alpha + R^4} \right)$$

Сформулируем математическую модель погрешности углоизмерительного оборудования, зависящую от наклона оси тахеометра. На рис. 2, а представлена геометрическая трактовка модели.

Для вывода необходимых зависимостей рассмотрим только часть построения (см. рис. 2, б). В равностороннем треугольнике AOB равны стороны AO = BO, которые представляют радиус шкалы тахеометра R. Угол между AO и BO составляет α . Используя теорему синусов, получим

$$a = 2R \sin(\alpha / 2).$$

С учетом того, что $OO_1 = BB_1$ (см. рис. 2, а), определим значение стороны b из прямоугольного треугольника ABB₁:

$$b = \sqrt{a^2 + R^2 \tan^2 \varphi}.$$

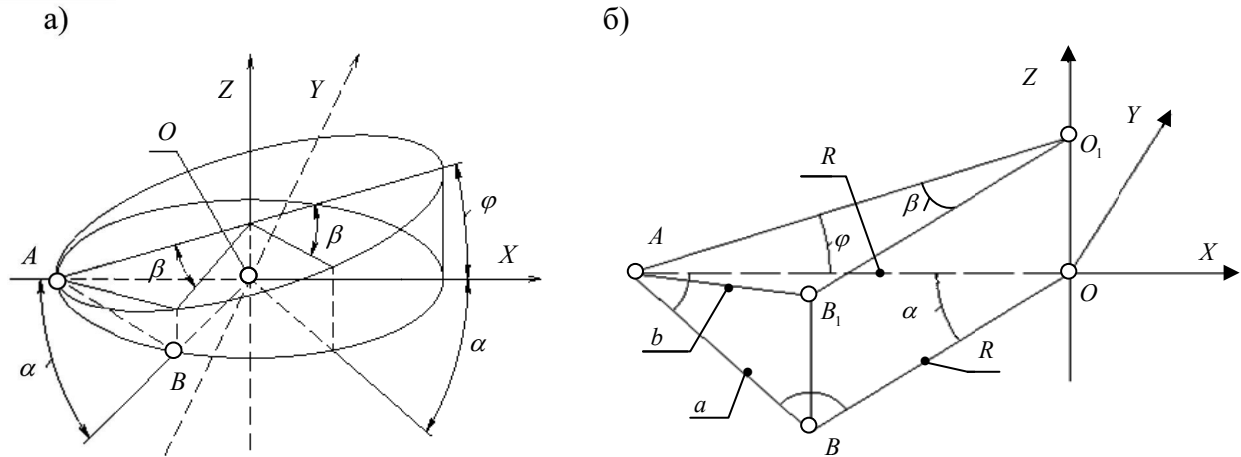


Рис. 2. Схема возникновения погрешности

По построению $BO = B_1O_1$ и, используя теорему косинусов для треугольника ABB_1 , получим

$$b^2 = R^2 + (R/\cos\varphi)^2 - 2R(R/\cos\varphi)\cos\beta.$$

После исключения из уравнений величин a и b соотношение между углами примет вид:

$$\cos\beta = \cos\alpha \times \cos\varphi.$$

Погрешность Δ , вызванная наклоном оси тахеометра относительно плоскости вращения призмы, составляет

$$\Delta = \beta - \alpha.$$

Дальнейшая реализация представленной математической модели исследуемой погрешности выполнялась в среде Excel.

Экспериментальные исследования выполнены на универсальном метрологическом комплексе, состоящем из высокоточного кругломера мод.299, эталонной стеклянной призмы-многогранника (24 грани), автоколлиматоров АК-0,25, углового преобразователя и устройствами цифровой индикации. Измерения погрешности проводились для трех значений угла наклона: $0''$; $77''$; $335''$. Результаты измерений показаны на рис. 3.

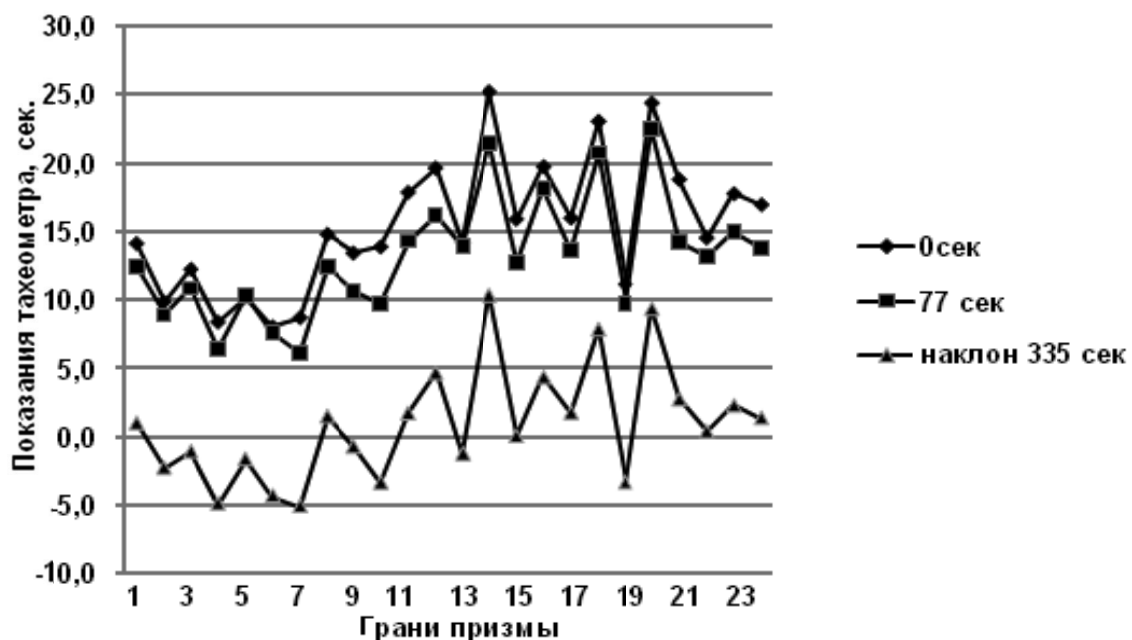


Рис. 3. Показания тахеометра при различных углах наклона его оси вращения

Шишкин С. Б., Шишкин Б. В.

СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Сравнение экспериментальных результатов и вычислений с использованием математической модели позволяет заключить:

1. В интервале углов наклона от $0''$ до $77''$ погрешность по экспериментальным данным изменяется на $2,3''$; по математической модели – на $1,8''$.

2. В интервале углов наклона от $77''$ до $335''$ погрешность по экспериментальным данным изменяется на $12,2''$; по математической модели – на $3,0''$.

3. Изменение погрешности носит постоянный характер, что подтверждает разработанную математическую модель.

4. Расхождение между экспериментальными данными и математической моделью можно объяснить невозможностью установки тахеометра и призмы без эксцентриситета и наличием случайных погрешностей, вызванных наведением визирной трубы тахеометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишкин, С. Б. Проверка углоизмерительного оборудования при сборочных операциях / С. Б. Шишкин, Б. В. Шишкин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – № III-1(3). – С. 70-72.

Петров Ю. А., Тихомиров В. А.
Y. A. Petrov, V. A. Tikhomirov

АРМ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ ЗАМКНУТЫХ КОНТУРОВ

AN AUTOMATED WORKSTATION FOR TYPE SYNTHESIS OF LEVER MECHANISMS BASED ON CLOSED LOOPS



Петров Юрий Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: PetrovUA1940@yandex.ru.
Mr. Yuri A. Petrov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: PetrovUA1940@yandex.ru.



Тихомиров Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой математического обеспечения и применения ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: kmopevm@knastu.ru.
Mr. Vladimir A. Tikhomirov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Аннотация. В статье описывается методика структурного синтеза схем механизмов и ее программная реализация в виде автоматизированного рабочего места. Приводятся алгоритмы математической модели, реализованные в среде MathCAD.

Summary. The paper deals with a technique for type synthesis of a mechanism's diagrams and with its software implementation in the form of an automated workplace. Algorithms of mathematical modelling in the MathCAD environment are offered.

Ключевые слова: звено, кинематическая пара, структурная схема, кинематическая цепь, форма цепи.

Key words: segment, kinematic pair, block diagram, kinematic chain, the form of chain.

УДК 621.01

Теория механизмов и машин (ТММ) является одной из важнейших научных дисциплин машиноведения. Одним из основных ее разделов является структура механизмов, в которой закладываются методологические основы всей науки о машинах и механизмах.

Известно, что основные показатели новых машин-автоматов, манипуляторов промышленных роботов и других систем закладываются на этапе выбора принципа действия, т.е. на этапе структурного синтеза их кинематических схем. Благодаря работам многих отечественных и зарубежных ученых, в настоящее время созданы основные понятия и термины теории механизмов, разработана классификация механизмов, машин и их элементов. Разработаны различные методики структурного синтеза механизмов, например:

- получить новую кинематическую схему механизма можно путем модификации существующей, заменив в ней одну или несколько кинематических пар на пары другой реали-

зации или другого класса. Поэтому нужна была теория кинематических пар. Ее разработкой занимались многие ученые, такие как академик П.Л. Чебышев, Франц Рело, профессора П.О. Сомов, А.П. Малышев, В.В. Добровольский, академик И.И. Артоболевский и многие другие;

- получить новую схему механизма можно путем создания одного или нескольких исходных механизмов и присоединения к ним групп звеньев с нулевой степенью подвижности (групп Ассура);

- получить новую схему механизма можно также, если задать в пространстве положения направляющих или осей вращения входных и выходных звеньев, а затем сконструировать кинематическую цепь, соединяющую эти звенья [1].

При разработке структурного синтеза механизмов машин в памяти ЭВМ можно было бы записать банк данных (БнД), охватывающий огромное количество различных, теоретически пригодных к использованию *кинематических схем механизмов (КСМ)*, большая часть которых описана в известном справочнике механизмов И.И. Артоболевского. Затем, по сформулированным критериям отбора программным путем можно было бы просмотреть весь банк данных и отобрать необходимые схемы.

Однако банк данных не может содержать информацию обо всех существующих механизмах в связи с их огромным количеством. Поэтому он должен быть сформирован из таких носителей минимальной информации о структуре, из которых можно получить любую схему механизма программным путем.

Проиллюстрируем свойства КСМ на примере кулисно-рычажного механизма 1001 [2] (см. рис. 1).

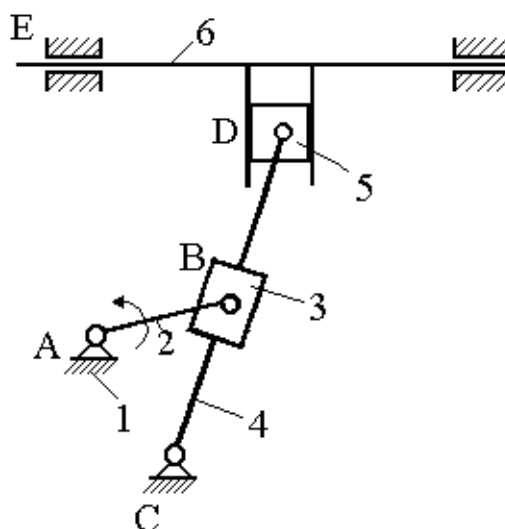


Рис. 1. Кинематическая схема механизма

Она имеет:

- число звеньев ($n = 6$);
- число кинематических пар ($m = 7$), из которых 3 поступательные (П) и 4 вращательные (В);
- число контуров ($k = 2$);
- последовательность соединения звеньев в каждом контуре:
1-й контур (1, 2, 3, 4), 2-й контур (1, 4, 5, 6);
- подвижность механизма ($W = 1$), определяемая по формуле Сомова-Малышева:

$$W = (6 - \nu) \cdot (n - 1) - \sum_{j=\nu+1}^5 P_j \cdot (j - \nu), \quad (1)$$

где P_j – количество пар j -го класса по классификации И.И. Артоболевского ($P_7 = 7$);

- число общих ограничений накладываемых кинематическими парами по классификации В.В. Добровольского ($v = 3$);
- многопарность звеньев (SP). Для схемы, приведенной на рис. 1, имеем:

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} SP_i = nSP_1 = 0; SP_2 = 4; SP_3 = 2; SP_4 = 0 \dots,$$

где SP_i – число звеньев с i -кинематическими парами;

- метрика механизма, т.е. размеры его звеньев;
- стойка (звено 1); обобщенная координата – входное звено – 2, выходные – 4, 6 (см. рис. 1).

С кинематической схемой механизма тесно связано понятие **кинематической цепи (КЦ)**. Кинематическая цепь (см. рис. 2) – это система звеньев, связанных между собой кинематическими парами. Звенья цепи могут быть **полуповодковыми** (однопарными), например, свободно вращающийся шкив, ротор, педаль велосипеда, захват робота; **поводковыми** (двупарными), последовательное соединение которых образует двухповодковые цепочки (например, звенья 2 – 3 и 5 – 6 на рис. 2), и **многопарными**, имеющими более двух кинематических пар (звенья 1 и 3 на рис. 2).

В дальнейшем будем рассматривать только кинематические цепи, имеющие один или несколько замкнутых контуров.

Известно, чтобы получить механизм из КЦ, необходимо в ней выбрать стойку, подсчитать подвижность (W), назначить входные, выходные звенья и задать метрику (схема на рис. 1 получена из КЦ на рис. 2). Остальные свойства КЦ наследуют от КСМ (вернее наоборот).

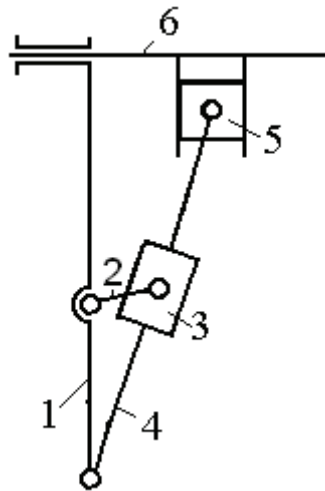


Рис.2. Кинематическая цепь механизма

Поэтому задачу структурного синтеза механизмов сведем к аналогичной задаче синтеза кинематических цепей.

КЦ тесно связана с понятием **структурная схема (ССКЦ)**. Структурная схема КЦ (см. рис. 3) имеет часть свойств КСМ:

- число звеньев ($n = 6$);
- число кинематических пар ($m = 7$) без указания их классов;
- число контуров ($k = 2$);
- последовательность соединения звеньев: 1-2-3-4, 1-4-5-6;
- многопарность звеньев $SP_i, i = 1 \dots i_{\max}$.

В структурной схеме можно выделить двухповодковые цепочки (для рассматриваемого примера их две (2-3), (5-6)).

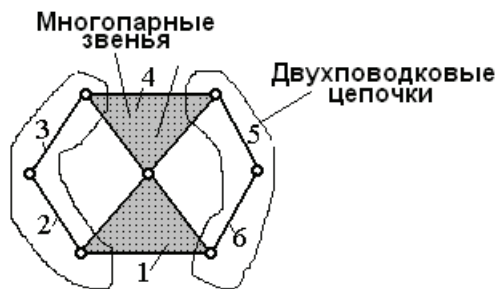


Рис. 3. Структурная схема КЦ

Упрощенное изображение замкнутой кинематической цепи, состоящей из многопарных звеньев и двухповодковых цепочек, последовательно соединенных кинематическими парами, назовем **формой цепи** (см. рис. 4).

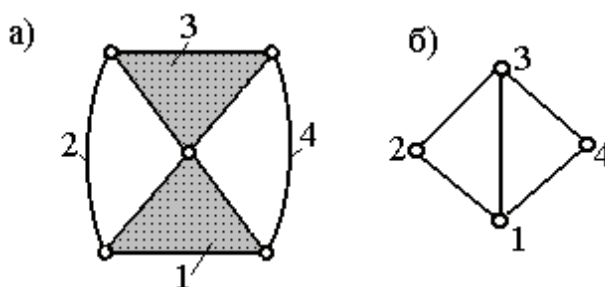


Рис. 4. Форма цепи (а) и ее граф (б)

Форма цепи (ФЦ) инвариантна относительно плоскостей движения звеньев (т.е. плоские и пространственные кинематические цепи имеют одну и ту же форму цепи), классов кинематических пар, числа двупарных звеньев в двухповодковых цепочках, подвижности кинематической цепи (из одной формы цепи можно получить механизм любой подвижности). Звенья и цепочки в форме цепи перенумеруем цифрами 1, 2, ..., n.

ФЦ несет в себе минимальную информацию о структурной схеме:

- число многопарных звеньев с учетом числа двухповодковых цепочек ($n_{\phi} + n_{\psi} = 4$);
- число кинематических пар ($m_{\phi} = 6$);
- многопарность ($SP_2 = 2, SP_3 = 2$);
- число контуров ($k = 2$);
- последовательность соединения цепочек с многопарными звеньями (1-2-3, 1-3-4).

В связи с этим ее можно использовать как исходный объект структурного синтеза, несущий в себе минимальное количество информации схемы механизма.

На основе понятия ФЦ может быть разработана методология структурного синтеза механизмов машин, выполняемая в следующей последовательности:

- 1) синтез форм цепей (ФЦ);
- 2) отбор форм цепей в соответствии с заданными критериями;
- 3) создание структурной схемы кинематической цепи (ССКЦ);
- 4) отбор ССКЦ по заданным критериям;
- 5) создание кинематической цепи (КЦ);
- 6) отбор КЦ по заданным критериям;
- 7) создание кинематической схемы механизма (КСМ).

В среде ВРWin можно сформировать следующую схему разработки автоматизированного рабочего места (АРМ) проектировщика (см. рис. 5).

Синтез ФЦ начинается с расчета возможных сочетаний многопарных звеньев. Пусть:

- k – число контуров ФЦ;
- i – многопарность звена ФЦ;

SP_i – число звеньев, имеющих i – кинематических пар;
 i_{max} – максимальное число элементов кинематических пар на одном звене;
 $n_{\phi} + n_{ц}$ – общее число звеньев ФЦ (включая двухповодковые цепочки);
 m_{ϕ} – общее число кинематических пар ФЦ.

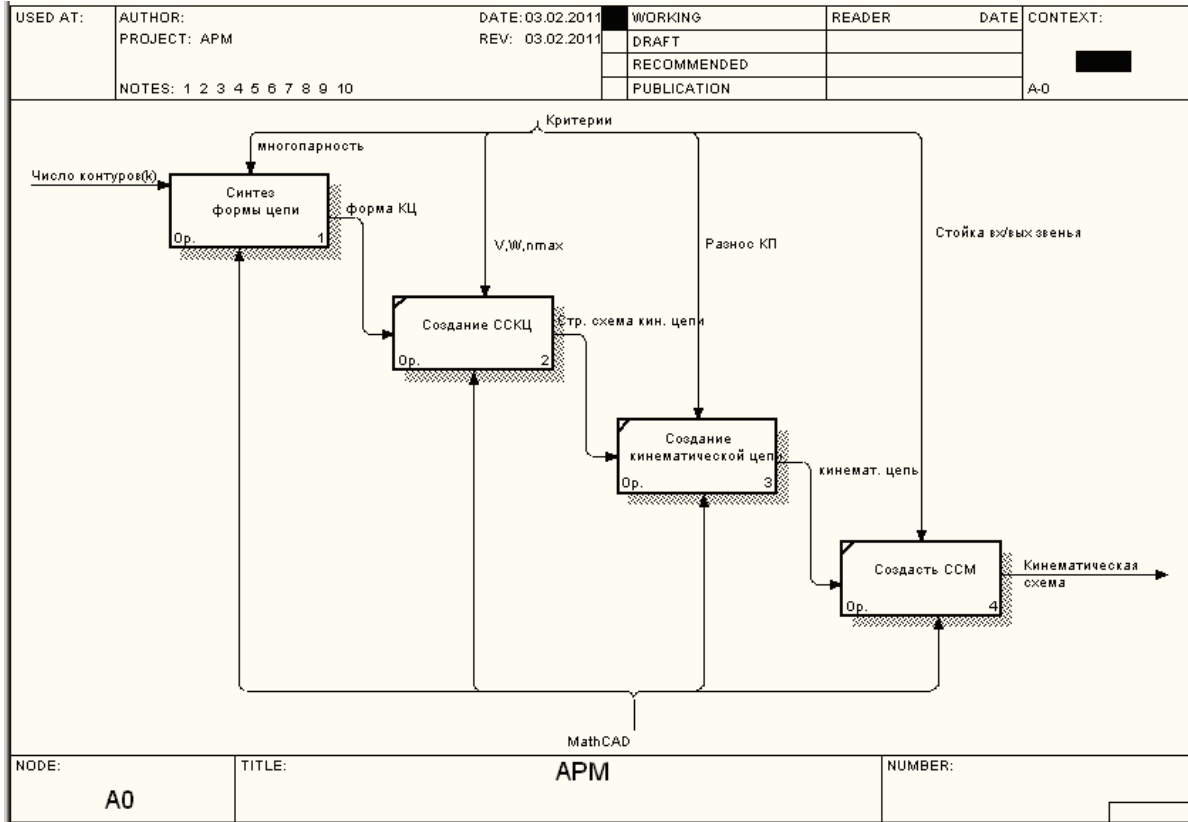


Рис. 5. Методика структурного синтеза схем механизмов

Тогда для разработки математической модели расчета возможных сочетаний многопарных звеньев используем следующие инварианты:

- связь числа контуров, пар и звеньев:

$$m_{\phi} = n_{\phi} + k - 1; \quad (2)$$

- общее число звеньев, равное сумме многопарных и двухпарных звеньев (цепочек):

$$\sum_{i=2}^{i_{max}} SP_i = n; \quad (3)$$

- удвоенное число кинематических пар, равное сумме всех многопарных и двухпарных звеньев (цепочек):

$$2 \cdot m_{\phi} = \sum_{i=2}^{i_{max}} i \cdot SP_i \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2), получим:

$$\sum_{i=2}^{i_{max}} (i - 2) \cdot SP_i = 2 \cdot (k - 1) \quad (5)$$

Анализ формулы (5) показал, что $i_{max} = 2 \cdot (k - 1) + 2 = 2k$, тогда расчет возможных сочетаний многопарных звеньев ФЦ (без двухповодковых цепочек) можно выполнить по формуле

$$\sum_{i=2}^{2 \cdot k} (i - 2) \cdot SP_i = 2 \cdot (k - 1) \quad (6)$$

Расчет возможных сочетаний многопарных звеньев ФЦ по заданному числу контуров k выполняет программный модуль $RV(k)$, реализованный в среде MathCAD-14.

Результаты расчета по программному модулю $RV()$ для $k = 3$ представлены в табл. 1. В первом ее столбце указано число контуров (k), во втором – число многопарных звеньев такого набора ($\sum SP_i$), в третьем – число кинематических пар (m_ϕ), в остальных столбцах – набор многопарных звеньев (SP_i), из которого можно создать форму цепи с заданным числом контуров.

Таблица 1
Возможные сочетания многопарных звеньев ФЦ для $k = 3$

$$M1 = \begin{pmatrix} k & 2m_\phi & n_\phi & SP_3 & SP_4 & SP_5 & SP_6 \\ 3 & 12 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 10 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 8 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & 8 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Отбор возможных сочетаний многопарных звеньев ФЦ осуществляется с помощью критерия, ограничивающего их многопарность: $SP_i \leq \text{число}$, где *число* – значение, устанавливаемое пользователем (по умолчанию для заданного SP_i оно равно $2m_\phi$).

Выберем i -ю строку из матрицы $M1$, например, $i = 1$:

i	k	$2m_\phi$	n_ϕ	SP_3	SP_4	SP_5	SP_6
1	3	10	3	2	1	0	0

и проанализируем ее. Для создания ФЦ имеем два трехпарных ($SP_3 = 2$) и одно четырехпарное ($SP_4 = 1$) звенья, из которых можно создать ФЦ с тремя ($k = 3$) контурами (см. рис. 6).

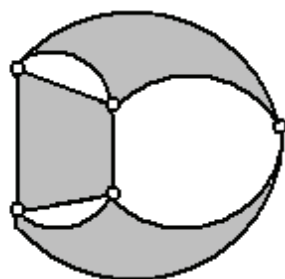


Рис. 6. ФЦ, созданная по данным из матрицы $M1$ ($i = 1$)

Из этой ФЦ можно создать несколько других ФЦ, если дополнить ее двухповодковыми цепочками $n_{ц}$, число которых может варьироваться в пределах $0 \leq n_{ц} \leq m_\phi$ (см. рис.7).

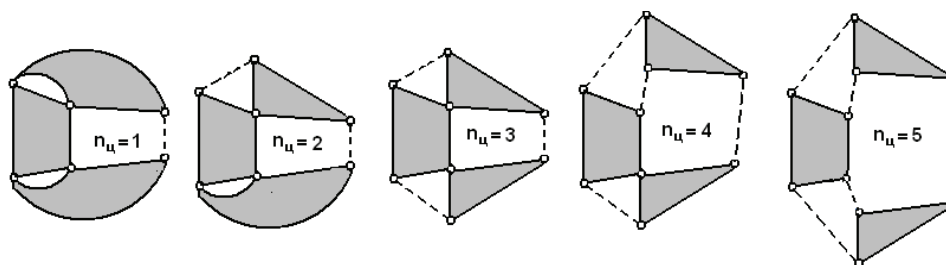


Рис. 7. ФЦ с двухповодковыми цепочками

В дальнейшем рассмотрим ФЦ, имеющие максимальное число двухповодковых цепочек $n_{ц} = m_{\phi} = 5$. Пронумеруем (см. рис. 8):

- многопарные звенья (одной десятичной цифрой);
- кинематические пары звеньев (двумя десятичными цифрами: первая – номер звена, вторая – номер кинематической пары).

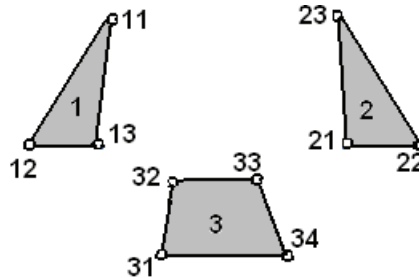


Рис. 8. Обозначения звеньев и кинематических пар.

Выбранная строка из матрицы $M1$ используется для создания различных форм цепей следующим образом. Она сначала записывается в виде одномерного массива mas :

$$mas: \{11 \ 12 \ 13 \ 21 \ 22 \ 23 \ 31 \ 32 \ 33 \ 34\},$$

из которого затем составляется двумерный массив A , имеющий две строки:

$$A: \begin{matrix} 11 & 12 & 13 & 21 & 22 \\ 23 & 31 & 32 & 33 & 34 \end{matrix}$$

каждый столбец которого указывает, какие кинематические пары многопарных звеньев связаны данной двухповодковой цепочкой (см. рис. 9).

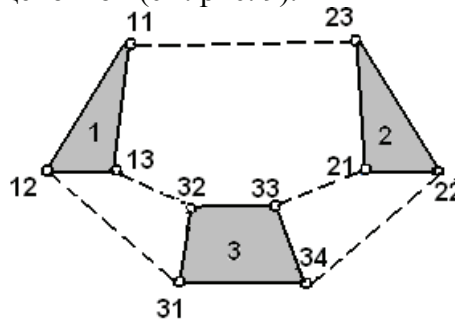


Рис. 9. ФЦ, построенная по матрице A

При изменении порядка соединения кинематических пар многопарных звеньев могут получиться различные формы цепи, которые могут содержать как изоморфные (структурно-одинаковые), так и неизоморфные (структурно-различные) ФЦ. Программным путем можно отобрать структурно-различные формы цепи (см. рис.10, 11):

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	11	23	12	31	13	32	21	33	22	34
1	21	23	12	31	13	32	11	33	22	34
2	11	23	32	31	13	12	21	33	22	34
3	11	23	33	31	13	32	21	12	22	34
4	11	23	12	31	13	32	34	33	22	21

Рис. 10. Таблица форм цепи

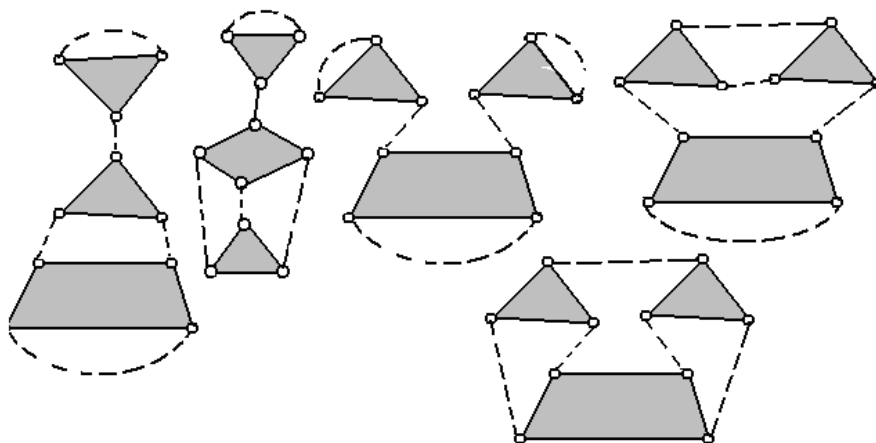


Рис.11. Структурно-независимые ФЦ при k = 3

Отобразить любую форму цепи в среде MathCAD-14 можно с помощью декартового графика (см. рис.12).

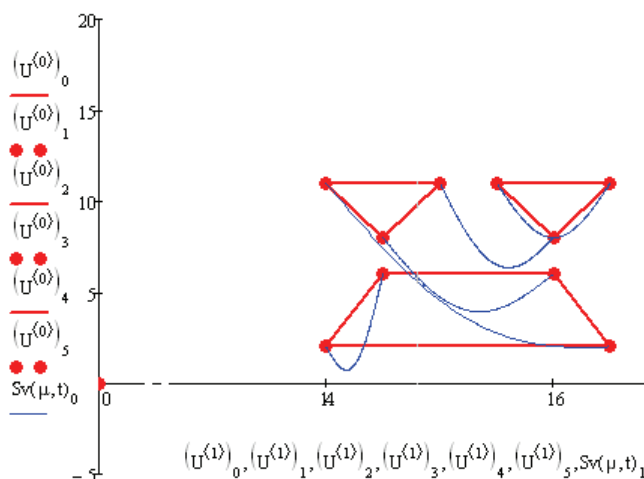


Рис. 12. Изображение формы цепи для k = 3, i = 1.

Из таблицы s можно выбрать любую (j-ю) форму цепи и на ее основе построить кинематическую цепь с заданными свойствами. Выберем, например, форму цепи s₀:

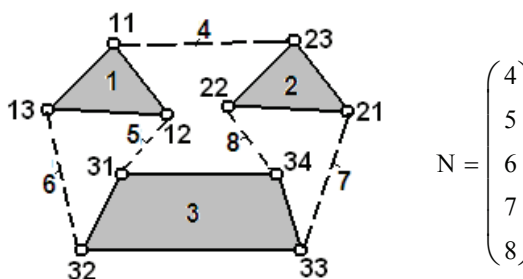
$$(\mathbf{s}^T)^{(0)T} = \begin{array}{c|cccccccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \hline 0 & 0 & 11 & 23 & 12 & 31 & 13 & 32 & 21 & 33 & 22 & 34 \end{array}$$


Рис. 13. Форма цепи, выбранная для дальнейшей проработки

С помощью построенного вектора N (см. рис. 13), можно переобозначить двухповодковые цепочки формы цепи, описанные через кинематические пары звеньями (например, цепочка 11-23 обозначена звеном 4, цепочка 12 – 31 звеном 5 и т.д.). Тогда программным путем можно описать независимые контуры формы цепи через номера звеньев (матрица K):

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 6 & 0 & 0 \\ 2 & 7 & 3 & 8 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 2 & 8 & 3 & 5 \end{pmatrix} \quad W = 1 \quad W_k = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

По матрице K можно программным путем определить общую подвижность формы цепи (W) и подвижность каждого наслаиваемого контура (W_k). Эти данные используются при синтезе двухповодковых цепочек и кинематических пар.

Из созданной структурной схемы могут быть получены плоские ($v = 3$) или пространственные ($v \neq 3$) кинематические цепи с различными W и n (см. рис. 14).

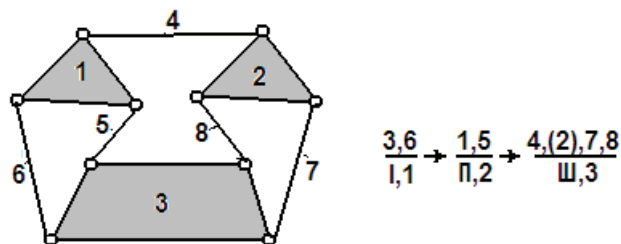


Рис. 14. Структурная схема кинематической цепи ($v = 3, W = 1$).

Приняв за стойку звено 3, входное звено 5, заменив две кинематические пары с вращательных на поступательные и две пары пятого класса на одну пару четвертого класса, получим кинематические схемы механизмов, показанные на рис.15.

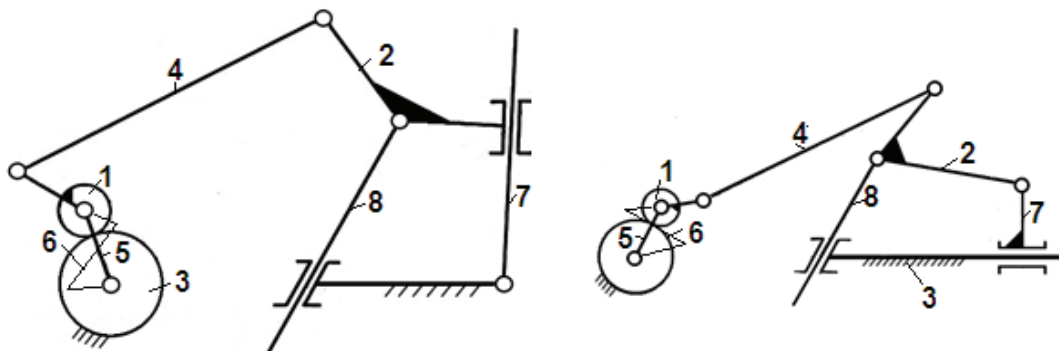


Рис. 15. Кинематические схемы механизмов

ЛИТЕРАТУРА

1. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, Е. В. Самар // Учёные записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2012. – № 4-1(12).
2. Артоболевский, И. И. Механизмы в современной технике: справ. пособие: в 7 т. / И. И. Артоболевский. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1979 – 1981. – Т. 4.
3. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов / И. И. Артоболевский – М.: Наука, 1988. – 640 с.
4. Бертяев, В. Д. Теоретическая механика на базе MathCAD: практикум / В. Д. Бертяев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.
5. Доев, В. С. Сборник заданий по теоретической механике на базе MathCAD / В. С. Доев, Ф. А. Доронин. – СПб.: Лань, 2010. – 592 с.
6. Петров, Ю. А. Современные математические пакеты : учеб. пособие / Ю. А. Петров. – 2-е изд., перераб. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 202 с.
7. Петров, Ю. А. САПР и АРМ: учеб. пособие. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2004. –131 с.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS TECHNOLOGY

Евстигнеев А. И., Сидоров А. И., Бердников Н. В., Коновалова Н. С.
A. I. Evstigneev, A. I. Sidorov, N. V. Berdnikov, N. S. Conovalova

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДООБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО КОНЦЕНТРАТА

ACID TREATMENT OF GOLD CONCENTRATE: POSSIBILITIES AND PERSPECTIVES

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: offise@knastu.ru

Mr. Alexey I. Evstigneev – Doctor of Engineering, Professor, Provost for Research at Komsomolsk-on-Amur State Technical University, the Honoured Scientist of Russia (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: offise@knastu.ru.

Сидоров Алексей Иванович – научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: natasi@rambler.ru

Mr. Alexey I. Sidorov – Research Fellow, Komsomol-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: natasi@rambler.ru.

Бердников Николай Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, зам. директора по научной и инновационной работе, зав. лабораторией физико-химических методов исследования, руководитель ХИАЦ (Россия, Хабаровск). E-mail: nick@itig.as.khb.ru

Mr. Nikolai V. Berdnikov – PhD in Geology and Mineralogy, Deputy Director for Research and Innovation, Head of Physicochemical Laboratory, Director of Khabarovsk Innovation Analytical Center (Russia, Khabarovsk). E-mail: nick@itig.as.khb.ru.

Коновалова Наталья Сергеевна – младший научный сотрудник Хабаровского института тектоники и геофизики ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: nick@itig.as.khb.ru

Ms. Natalya S. Conovalova – Junior Research Fellow, Khabarovsk Institute for Tectonics and Geophysics, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: nick@itig.as.khb.ru.

Аннотация. Разработаны дополнительные технологические операции, повышающие эффективность дообогащения золотосодержащего концентрата.

Summary. The paper proposes supplementary process operations in order to raise the efficiency of acid treatment of gold concentrate.

Ключевые слова: концентрат, обогащение, фракция, включения, дробление, отделение частиц.

Key words: ore concentrate, ore preparation, fraction, inclusions, crushing, separation of solids.

УДК 622.017.2:504.064.43

Горная порода, поступающая с рудника при добыче полезных ископаемых, содержит большое количество пустых пород, а по содержанию полезного компонента обычно не удовлетворяет требованиям технологического использования и переработки [1].

Нужный компонент, в лучшем случае, вкраплен в пустую породу либо находится в виде отдельных примесных зерен (частиц), или в виде химически связанных соединений. Эффективность извлечения нужных компонентов напрямую зависит от их раскрытия в процессе рудоподготовки. Разработано и используется много различных технологических процессов, направленных на повышение селективности раскрытия, по снижению крупности кусков руды на этапе их дробления и пр.



Дробление и извлечение направлено на раскрытие минеральных зерен, цель которого получение высокой доли нужных частиц, которые в следующем цикле обогащения наиболее эффективно разделяются.

В нашем исследовании золотосодержащий концентрат получен в процессе подготовки с использованием дробилок молоткового и роторного типа и прошел обогащение гравитационным способом. Учитывая то, что концентрат имеет большой диапазон по крупности (0,01 – 1,2 мм) первоначально была произведена его классификация или рассев.

В исследованиях исходный концентрат с содержанием золота 328 г/т пропущен через воздушный классификатор с горизонтальной подачей воздушного потока.

Получены следующие результаты классификаций и обогащения по бункерам:

1-й бункер – 45 % концентрата (0,5 – 0,9 мм) – 213 424,18 мг/т;

2-й бункер – 25 % (0,05 – 0,2) – 470 253,43 мг/т;

3-й бункер – 20 % (0,05 – 0,1) – 502 950,93 мг/т;

4-й бункер – 10 % (0,02 – 0,08) – 425 080,93 мг/т.

Полученные результаты позволяют сделать следующие предположения:

– зерна золота находятся в концентрате на атомном уровне (очень мелкие);

– повышенное содержание золота в бункерах 2 – 4 против 1-го бункера (213 г/т) и исходного (328 г/т) объясняется тем, что мелкодисперсные смеси были обогащены при гравитационном способе, и пустая порода была отделена и удалена.

Поэтому было предложено [1] до проведения гравитационного способа обогащения пропустить исходный концентрат через воздушный классификатор с горизонтальным воздушным потоком, а крупную фракцию (бункер 1) вернуть на дополнительное измельчение. В результате концентрация золота увеличивается в 1,5 раза.

Для выяснения взаимоотношений включений золота с пиритом при различной интенсивности дробления продукта обогащения проведены электронно-микроскопические исследования с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом. Метод позволяет эффективно производить поиск микрочастиц золота, изучать их форму и состав. Исследования проводились на растровом электронном микроскопе EVO 40HV (Carl Zeiss, Германия), оснащенном энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобритания). Чувствительность метода не ниже первых масс. %, диаметр электронного пучка 20 – 30 нм, наиболее часто применявшееся ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка 100 пА. Для количественного анализа использовался комплексный эталон № 6067 фирмы «МАС» (Великобритания) и библиотека профилей линий элементов, встроенная в программу INCA. Поиск и фотографирование включений золота велся в режиме обратно рассеянных электронов (В SE-детектор), при котором золото, как элемент с большим массовым числом, интенсивно «светится» на фоне остальных порообразующих минералов. Микроанализ проводился в режиме вторичных электронов (SE-детектор).

Продукт обогащения (пирит различной интенсивности дробления) наносился на предметный столик микроскопа с помощью графитовой клейкой проводящей пленки Agar Scientific. Напыление препарата не применялось, чтобы исключить влияние напыляемого вещества на результаты поиска и анализа.

В результате анализа обнаружены включения золота, теллуридов золота (калаверит AuTe_2 , монтбраит Au_2Te_3) и их сростки.

Включения золота встречаются как в свободном виде (см. рис. 1, *a*), так и в ассоциации с пиритом. Золотины в свободном виде обычно крупные (110 – 130 мкм) (см. рис. 2, *a*), в их составе кроме золота присутствуют серебро, медь и ртуть (до 2 – 10 вес. %).

В ассоциации с пиритом золота находится как в виде включений (см. рис. 1, *b*), так и в виде микронаростов на плоскостях сколов (см. рис. 1, *в*). Размер таких золотин колеблется от нескольких микрометров (мкм) до 50 мкм (см. рис. 2, *a*), в их составе кроме золота также присутствуют серебро, медь и ртуть (до 5 – 7 вес. %).

Теллуриды золота (калаверит $AuTe_2$, монтбрайт Au_2Te_3 с примесью висмута и серы) встречаются в пирите только в виде включений (см. рис. 1, з) размером от нескольких микрометров до 30 мкм (см. рис. 2, б).

Сростки золота с теллуридами представляют собой композиты (см. рис. 1, д), которые встречены только в виде включений в пирите размером от нескольких микрометров до 40 мкм (см. рис. 2, в).

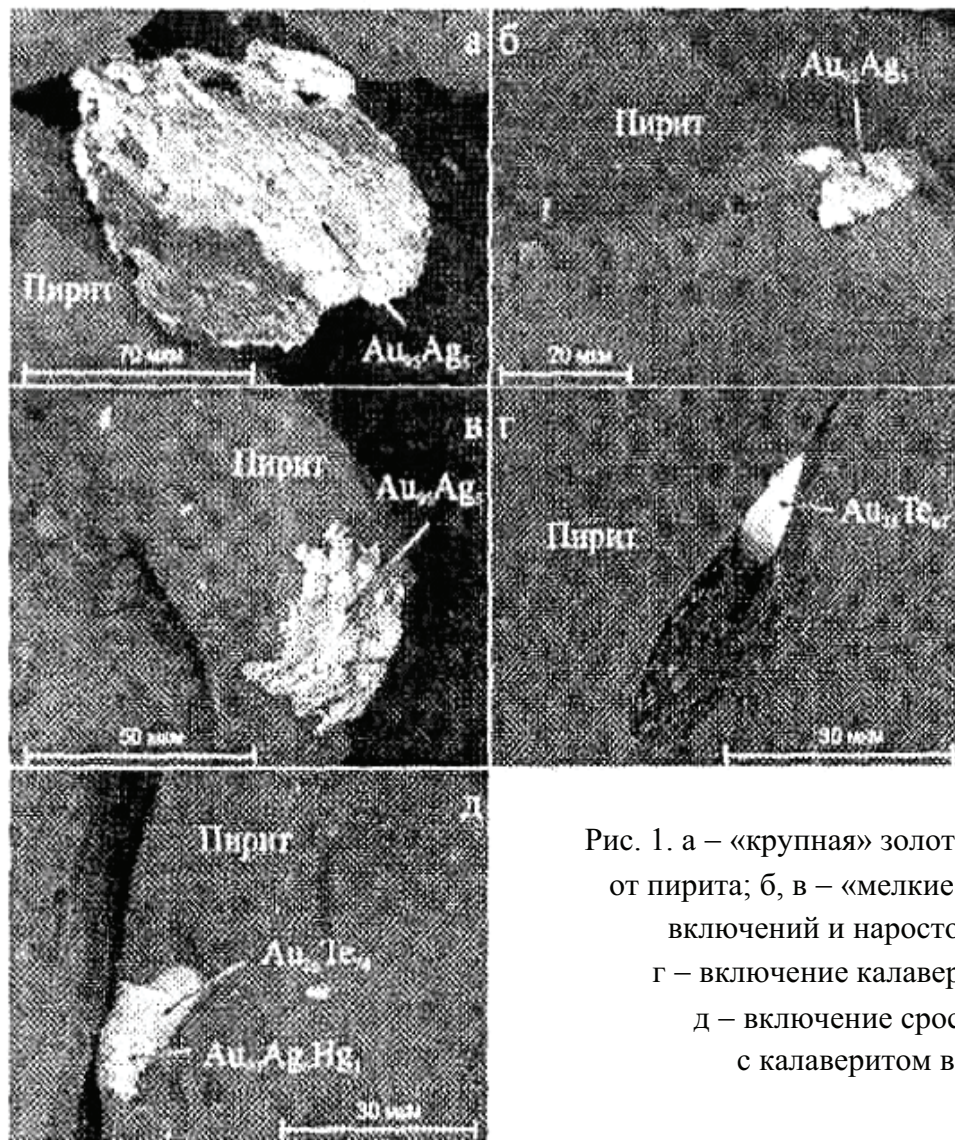


Рис. 1. а – «крупная» золотина, отделившаяся от пирита; б, в – «мелкие золотины в виде включений и наростов на пирите»; г – включение калаверита в пирите; д – включение сростка золота с калаверитом в пирите

Таким образом, можно заключить, что при данной степени измельчения освобождаются только золотины размером более 100 мкм. Их можно отделять гравитационным или флотационным способом. Золотины меньшего размера, как и теллуриды золота, остаются связанными с пиритом. Чтобы этот материал стал полностью доступен для извлечения методом цианирования, необходимо его измельчение до размеров частиц 10 – 50 мкм. Возникает вопрос – насколько это целесообразно?

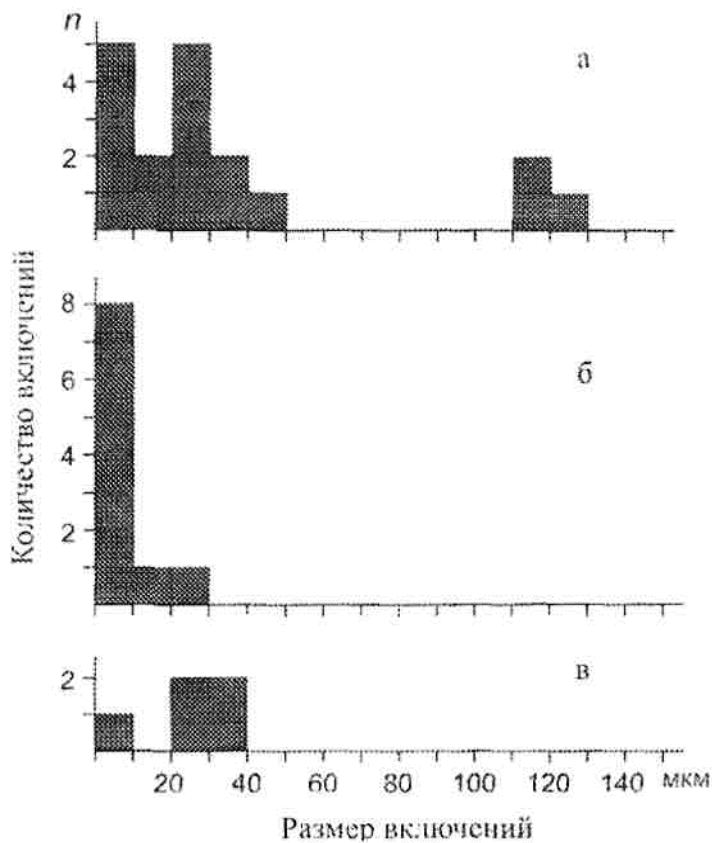


Рис. 2. Размеры включений золота (а), теллуридов золота б) и сростков золота с теллуридами (в) в пирите

«Крупных» (110 – 130 мкм) золотин в представленном материале обнаружено всего 3, а «мелких», включая теллуриды и их сростки с золотом – 30, т.е. в 10 раз больше. Если грубо принять объем золотин пропорциональным их размерам (так как в основном они имеют форму пластинок), средний размер «мелких» включений принять 20 мкм, а «крупных» 110 мкм, то общий «объем» «крупных» включений будет $3 \times 110 = 330$, а «мелких» – $30 \times 20 = 600$. Таким образом, вполне вероятно, что при недостаточном дроблении теряется около четверти золота (не половина, так как даже при примененном дроблении большая часть «мелких» включений частично вскрываются и становятся доступными для цианирования).

На втором этапе золотосодержащий концентрат подвергнут дроблению с использованием дробевого аппарата марки 42115 ООО «Завод Амурлитмаш», заменив дробь на исходный концентрат.

Установлено, что включения золота встречаются как в свободном виде, так и в ассоциации с пиритом. Золотины в свободном виде имеют крупность более 75 мкм, а в ассоциации с пиритом – 1 – 5 мкм. Тогда как в концентрате, прошедшем дробление в дробежном аппарате, произошло отделение золотин в пределах 5 – 100 мкм, а в исходном концентрате только 110 – 130 мкм.

В табл. 1 представлены результаты исследований размеров золотин в пирите и отделившихся.

Размеры приведены по наибольшему видимому поперечнику.

В пирите остались включения размером 1 – 5 мкм. Количество включений во всех образцах примерно одинаково.

Количество и размеры включений золота в пирите

Размер включений	Нумерация проб							Всего частиц
	6	6/1	6/2	6/3	6/4	6/5	6/6	
< 1 мкм	0	1	1	4	4	0	2	12
1 – 5 мкм	7	4	3	5	6	8	8	41
5 – 10 мкм	0	1	2	1	0	0	1	5
10 – 20 мкм	2	1	1	1	0	0	1	6
20 – 30 мкм	0	0	1	1	0	0	0	2
30 – 40 мкм	2	0	0	0	0	0	0	2
Всего	11	7	8	12	10	8	12	68

Если принять объем золотинок пропорциональным их размерам, то получаем следующие результаты:

- неотделившиеся золотины: $(1 - 5 \text{ мкм}) = 3 \text{ мкм} \times 41 \text{ шт.} = 123$;
- отделившиеся золотины: $(5 - 10 \text{ мкм}) = 7 \text{ мкм} \times 5 \text{ шт.} = 35$;
 $(10 - 20 \text{ мкм}) = 15 \text{ мкм} \times 6 \text{ шт.} = 90$;
 $(20 - 30 \text{ мкм}) = 25 \text{ мкм} \times 2 \text{ шт.} = 50$;
 $(30 - 40 \text{ мкм}) = 35 \text{ мкм} \times 2 \text{ шт.} = 70$.
 Итого: 245.

Общий объем отделившихся золотинок – 245, а находящихся в пирите – 123. Таким образом, после измельчения в дробебетном аппарате можно отделить гравитационным или флотационным способом 60 – 70 % золота, а в исходном концентрате отделенных золотинок 330 против 600 неотделенных.

Выводы. Таким образом, можно утверждать, что при измельчении концентрата в дробебетном аппарате происходит отделение золотинок размером более 5 мкм от пирита, а в исходном концентрате (до дробебетной обработки) – только свыше 100 мкм. Проведенное исследование позволяет утверждать об экономической целесообразности воздушной классификации рудного концентрата до операции гравитационного обогащения руды, а также измельчения руды ударно-кинетическим способом в дробебетном аппарате с одновременным отделением золотинок от пирита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верхотуров, А. Д. Монография М. В. Ломоносова «Первые основания металлургии, или рудных дел» и её значение для современной науки и образования / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилёв, А. И. Евстигнеев, Л. А. Коневцов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – № III-1(11)1. – С. 71-82.
2. Заявка на изобретение № 2011147998 от 24.11.2011 г. «Способ извлечения золота из пиритового концентрата» / А. И. Сидоров, А. И. Евстигнеев, Н. В. Бердников.



Черномас В. В., Евстигнеев А. И., Богданова Н. А.
V. V. Chernomas, A. I. Evstigneev, N. A. Bogdanova

СПОСОБ КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ УДАЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

METHODS FOR CONTROLLING THE SIZE OF CONSUMABLE PATTERNS IN METAL CASTING

Черномас Вадим Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией новых технологий в металлургии Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru

Mr. Vadim V. Chernomas – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Laboratory for Modern Metallurgy Technologies, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru.

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

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

Богданова Нина Анатольевна – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: joyful289@inbox.ru

Ms. Nina A. Bogdanova – PhD Candidate, Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: joyful289@inbox.ru

Аннотация. Достижение высоких показателей размерно-геометрической точности для протяженных и массивных отливок в литье по удаляемым моделям связано с большими трудностями, а иногда и невозможно из-за сложности изготовления моделей требуемой точности. Для устранения указанных недостатков предложена комплексная методика оценки размерной и геометрической точности удаляемых моделей, заключающаяся в определении реальных значений отклонений размеров удаляемой модели после ее изготовления и в процессе эксплуатации.

Summary. Achieving high dimensional/geometrical accuracy for elongated or solid castings made using consumable patterns is linked to great difficulties; sometimes it is impossible because of the complexity of manufacturing patterns having the tolerance required. In order to solve these problems the authors propose a comprehensive method for the estimation of dimensional and geometrical accuracy of consumable patterns relying on the process of defining the de-facto deviations of the size of a consumable pattern after its manufacture and while in service.

Ключевые слова: удаляемая модель, размерно-геометрическая точность, модельная композиция.

Key words: consumable pattern, dimensional geometrical accuracy, pattern composition.

УДК 621.74.045

С ростом потребности промышленности в точных отливках соответственно возрастают и требования к их качеству. Точность и чистота поверхности отливок являются одними из главных критериев оценки эффективности технологических процессов литья. Высокие показатели по этим признакам обеспечивают отливки, которые получают в неразъемные высокоогнеупорные оболочковые формы по удаляемым (выплавленным, выжигаемым и растворяемым) моделям способом многослойного формообразования. Согласно [1] таким способом в

зависимости от габаритного размера и типа сплава рекомендовано получение отливок 3 – 11 классов точности. Однако достижение этих показателей для протяженных и массивных отливок связано с большими трудностями, а иногда и невозможно. Причинами этих трудностей являются сложности изготовления удаляемых моделей требуемой точности. До настоящего времени не существует комплексного способа определения размерной и геометрической точности выплавляемых моделей через свойства модельных композиций, из которых они изготовлены. В качестве этих свойств используют величину свободной или затрудненной усадки модельной композиции и её теплоустойчивость [2]. Однако эти параметры не являются показательными при оценке размерной и геометрической точности выплавляемых моделей. Это связано с тем, что для определения теплоустойчивости модельной композиции (МК) используются стержневые образцы, сформированные в условиях свободной усадки и стационарных тепловых условиях. Это исключает возможность возникновения в образце остаточных термических и усадочных напряжений, релаксация которых в конечном итоге может привести к образованию стандартного прогиба (2 мм) даже при нормальной температуре. Реальные выплавляемые модели обычно формируются в условиях затрудненной усадки и нестационарных тепловых условиях, поэтому величина теплоустойчивости МК не может характеризовать теплоустойчивость модели, которая изготавливается из этого материала, т.к. пластические деформации модели наступают ниже температуры теплоустойчивости МК. Этот эффект имеет наибольшее значение для протяженных и массивных моделей. При расчете температуры их возможного коробления (температуры теплоустойчивости) нельзя автоматически принимать за нее температуру теплоустойчивости МК.

В связи с этим возникла необходимость в разработке комплексного метода оценки размерной и геометрической точности удаляемых моделей, заключающегося в определении реальных значений отклонений размеров удаляемой модели после ее изготовления и в процессе эксплуатации. Для проведения испытаний изготавливают образец, имеющий форму плоского двутавра (см. рис. 1).

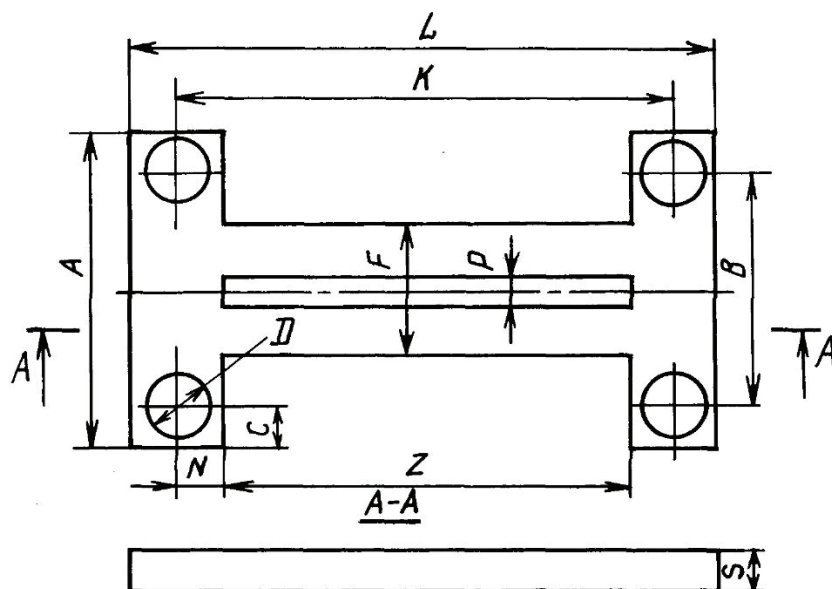


Рис. 1. Образец для оценки размерно-геометрической точности удаляемых моделей

Образец для проведения испытаний, имеющий конфигурацию плоского двутавра, моделирует процессы возникновения и релаксации усадочных и термических напряжений, возникающих в процессе изготовления удаляемой модели, а также позволяет оценить размер-



ную и геометрическую точность удаляемой модели не косвенным, а прямым путем (непосредственным измерением размеров образца).

Разработанный способ [3] позволяет связать размеры полости пресс-формы с размерами получаемой модели, а размеры модели – с размерами отливки. Следовательно, может быть получена опосредствованная связь размеров пресс-формы с размерами отливки, что является немаловажным при проектировании технологической оснастки. Конструкция пресс-формы позволяет получать образцы с базовыми размерами от 220×10^{-3} до 420×10^{-3} м при одинаковых технологических условиях. Сущность способа заключается в измерении размеров образца при температуре равной 20°C и 40°C . Методика предусматривает расчет позиционных допусков (1) по размерам N и C , отклонений расположения и диаметров отверстий (2), параллельности поверхностей (3) и оценку качества точности модели [4, 5].

$$EPP = \sqrt{(\Delta N)^2 + (\Delta C)^2}, \quad (1)$$

где EPP – позиционное отклонение; ΔN и ΔC – отклонения по размерам N и C .

$$T_p = \delta L, \quad (2)$$

где T_p – позиционный допуск; δL – предельные отклонения размеров B , K и D .

$$EPP = (F_{\max} - F_{\min}) / 2 = (P_{\max} - P_{\min}) / 2 = (S_{\max} - S_{\min}) / 2, \quad (3)$$

где EPP – позиционный допуск; F_{\max} , P_{\max} , S_{\max} – наибольшие значения размеров; F_{\min} , P_{\min} , S_{\min} – наименьшие значения размеров.

Перед проведением измерений при повышенной температуре (40°C) образец термостатируют в течение 1 ч и с точностью $0,05 \times 10^{-3}$ м измеряют его прогиб.

Измерение прогиба производят при нормальной и повышенной (40°C) температурах. По измеренным прогибам образцов строят деформационные кривые, позволяющие оценить коробление моделей.

При литье по выплавляемым моделям существенное влияние на размерно-геометрическую точность моделей оказывают ее физико-механические и теплофизические свойства. Увеличение температуры, массы и конструктивной сложности модели приводит к ее короблению, снижению размерной точности и ограничению размеров отливки. Комплекс исследований размерно-геометрической точности удаляемых моделей, проведенный с помощью разработанной методики, позволил выявить причины их недостаточного качества и предложить способы повышения размерно-геометрической точности удаляемых моделей [6-10].

Для получения массивных и протяженных моделей было предложено использование комбинированных моделей (КМ) [6]. Сущность процесса их получения заключается в следующем. Предварительно изготавливается пенополистироловая промвставка, причем размеры пенополистироловой промвставки по всем поверхностям меньше размеров полости пресс-формы для получения комбинированной выплавляемой модели. Затем пенополистироловая промвставка устанавливается и фиксируется в пресс-форме. В зазор между поверхностью пенополистироловой промвставки и внутренней поверхностью пресс-формы запрессовывается модельная композиция. КМ охлаждается и извлекается из пресс-формы.

На рис. 2 представлена блок-схема технологического процесса изготовления комбинированной выплавляемой модели.

Запрессовка модельной композиции осуществляется в предварительно нагретую до $35 - 40^\circ\text{C}$ пресс-форму на известном оборудовании, обеспечивающем давление прессования не менее $0,25$ МПа при температуре запрессовки на $3 - 5^\circ\text{C}$ превышающей температуру, рекомендуемую техническими условиями.

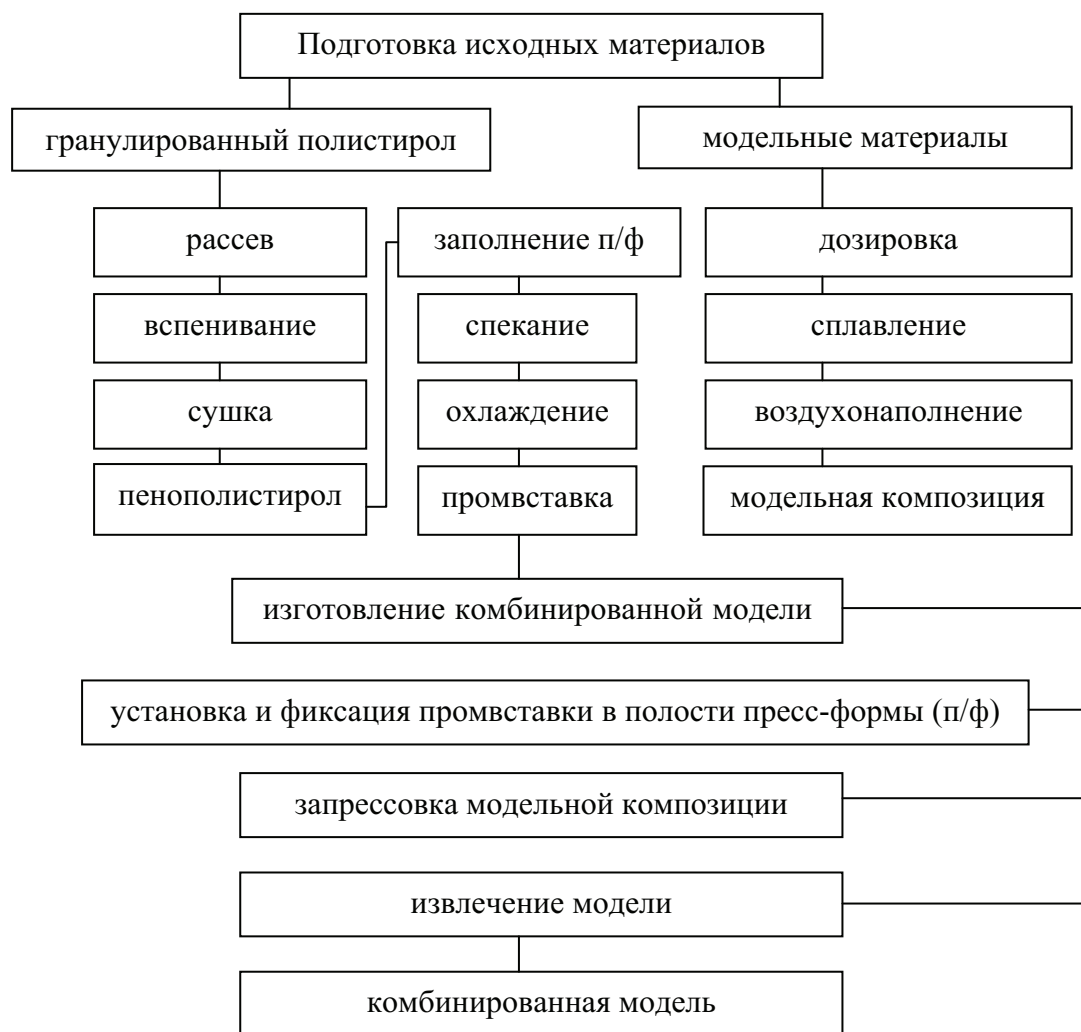


Рис. 2. Блок-схема технологического процесса изготовления комбинированной выплавляемой модели

Для оценки влияния основных конструктивных параметров КМ на формирование размерно-геометрической точности моделей была проведена серия экспериментов. В качестве объектов исследования было выбрано восемь типов комбинированных моделей с промвставками (основой) из пенополистирола марки ПСВ-Л (ОСТ 6-05-202-83) объемной массой 50 и 550 кг/м³ и облицовкой из модельной композиции ПС 50:50 с толщиной облицовки 2×10^{-3} и 4×10^{-3} м (см. табл. 1), представляющих собой пластины шириной 0,1 м, толщиной 0,015 м и базовым размером L.

В табл. 2 представлены абсолютные отклонения нейтральных осей для различных типов удаляемых моделей после извлечения их из пресс-формы и выдержки в течение 1 ч при нормальной (20 °С) и повышенной (40 °С) температурах.

Коробление КМ сопоставляли с двумя типами контрольных образцов из ПС 1:1. Для образцов с базой 0,220 м абсолютные отклонения не превышают 12 квалитет точности, в то время как отклонения контрольных образцов находятся в пределах 14 квалитета точности. Для моделей 3-го и 4-го типов коробление не наблюдается, что обусловлено высокими физико-механическими свойствами промвставки (объемная масса 550 кг/м³).



Объекты исследования

Тип модели	Толщина облицовочного слоя, $\times 10^{-3}$ м	Объемная масса промвставки, кг/м ³	Базовый размер модели (L), $\times 10^{-3}$ м
1	2	50	220
2	4	50	220
3	2	550	220
4	4	550	220
5	2	50	420
6	4	50	420
7	2	550	420
8	4	550	420

Влияние температуры на коробление моделей различно для каждого из представленных типов. Для КМ первого и второго типов релаксация внутренних остаточных напряжений приводит к увеличению абсолютных отклонений, по сравнению с нормальной температурой, на 5×10^{-5} м, а контрольных образцов – на $2,5 \times 10^{-3}$ м.

Для моделей с базой 0,420 м отклонения не превышают 14 квалитет точности, при этом максимальное отклонение $2,25 \times 10^{-3}$ м наблюдается у КМ пятого типа. Коробление моделей седьмого и восьмого типов не превышает 1×10^{-5} м, что соответствует 9 квалитету точности. Отклонения размеров контрольных образцов выходят за рамки 15 квалитета точности при наибольшем отклонении, равном $3,4 \times 10^{-3}$ м.

При температуре 40 °С у контрольных образцов происходит дальнейшая разгрузка, что приводит к их деформации и увеличению значений максимальных отклонений ($3,65 \times 10^{-3}$ м). Отклонения размеров всех типов КМ не измерились. Следовательно, в исследуемых пределах температура не влияет на деформационные процессы, протекающие в системе «промвставка – облицовочный слой МК». Таким образом, применение комбинированных выплавляемых моделей позволяет повысить геометрическую и размерную точность моделей, а также исключить влияние температуры на их коробление.

Согласно [2] температура теплоустойчивости модельной композиции ПС 50:50 составляет 30 °С, т.е. при этой температуре прогиб образца составляет 2 мм. Определение коробления разработанного образца при нормальной температуре (20 °С) показывает, что максимальное отклонение его нейтральной оси от координатной плоскости составляет: при базовом размере 220 мм – 1,55 мм; при базовом размере 420 мм – 3,4 мм. Таким образом, очевидно, что способ определения размерной и геометрической точности выплавляемых моделей, основанный на определении температуры теплоустойчивости модельной композиции, не описывает поведение модели, изготовленной из нее.

Таблица 2

Коробление моделей

Тип модели	Абсолютные отклонения от нейтральной оси модели при ее пошаговом измерении в направлении базового размера, $\times 10^{-3}$ м (в числителе – при температуре 20 °С, в знаменателе – при температуре 40 °С)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,00 0,05	0,05 0,05	0,15 0,15	0,35 0,40	0,45 0,45	0,55 0,60	0,50 0,60	0,30 0,40	0,15 0,20	0,05 0,10	0,05 0,10
2	0,05 0,10	0,15 0,15	0,10 0,15	0,10 0,10	0,05 0,10	0,05 0,10	0,05 0,05	0,05 0,15	0,10 0,20	0,15 0,20	0,15 0,20
3	коробление отсутствует										
4	0,05 0,05	0,05 0,05	0,00 0,00	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,10 0,10	0,15 0,15	0,10 0,10	0,05 0,05
ПС 50:50, 220 $\times 10^{-3}$ м	0,00 0,00	0,20 0,25	0,45 0,60	0,75 0,90	1,10 1,25	1,30 1,55	1,05 1,30	0,75 0,80	0,50 0,50	0,15 0,25	0,00 0,05
5	2,00 2,05	2,15 2,25	0,50 0,70	1,00 1,35	1,85 2,05	1,20 1,25	0,50 0,75	1,80 2,00	0,80 1,30	0,60 0,90	2,25 2,25
6	0,10 0,15	0,20 0,25	1,00 1,15	0,70 0,85	0,50 0,60	0,70 0,90	1,00 1,20	0,20 0,45	0,20 0,40	0,10 0,20	0,00 0,05
7	0,00 0,00	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,10 0,10	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,00 0,00
8	0,00 0,00	0,05 0,05	0,10 0,10	0,10 0,10	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,05 0,05	0,10 0,10	0,05 0,05	0,00 0,00
ПС 50:50, 420 $\times 10^{-3}$ м	0,10 0,15	0,80 0,65	1,65 1,50	2,35 2,35	2,70 3,05	3,25 3,65	2,85 3,15	2,30 3,15	1,70 1,75	1,10 0,95	0,00 0,05



ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 26645-85. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. – М., 2002. – 36 с.
2. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Я. И. Шкленника [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
3. Пат. RU 2136431 6 В 22 С 7/02. Способ контроля размеров выплавляемой модели / А. И. Евстигнеев, В. В. Черномас. – № 96101617/02; заявл. 29.01.96; опубл. 10.09.99. Бюл. № 25. – Ч. II.
4. ГОСТ 28187-89. Отклонения формы и расположения поверхностей. Общие требования к методам измерений. – М., 1999. – 20 с. (Основные нормы взаимозаменяемости).
5. ГОСТ 25346-89. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. – М., 2004. – 128 с. (Основные нормы взаимозаменяемости).
6. Пат. RU 2104818 6 В 22 С 9/04. Способ изготовления пенополистироловой газифицируемой модели / А. И. Евстигнеев, В. В. Черномас. – № 96101616/02; заявл. 29.01.1996; опубл. 20.01.1998. Бюл. № 6.
7. Пат. RU 2116862 6 В 22 С 7/02. Способ изготовления комбинированной выплавляемой модели / А. И. Евстигнеев, В. В. Черномас. – № 996101637/02; заявл. 29.01.96; опубл. 10.08.98. Бюл. № 22. – Ч. II.
8. Размерная точность полистироловых моделей / А. И. Евстигнеев, В. В. Черномас, В. Н. Комельков, Н. А. Семашко // Литейное производство. – 1997. – № 12. – С. 13-14.
9. Точность пенополистироловых моделей и отливок, полученных на их основе / А. И. Евстигнеев, В. В. Петров, В. В. Черномас, В. Н. Комельков // Литейное производство. – 2000. – № 3. – С. 43-44.
10. Салина, М. В. Влияние вакуумирования на физико-механические свойства и размерную точность выплавляемых моделей и отливок в литье по выплавляемым моделям / М. В. Салина, А. И. Евстигнеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2011. – № 5. – С. 55-60.

Якимов В. И., Паниван Г. Е., Захарова Е. В., Михель В. П., Муравьев В. И., Куриный В. В.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ
ОТЛИТЫХ В КОКИЛЬ «РОЖКОВОЙ» И «ГРЕБЕШКОВОЙ» ФОРМ СПЛАВА АМ4,5КД

Якимов В. И., Паниван Г. Е., Муравьев В. И., Захарова Е. В., Куриный В. В.
V. I. Yakimov, G. E. Panivan, V. I. Muravyev, E. V. Zakharova, V. V. Kuriny

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ХИМИЧЕСКОГО
СОСТАВА ОБРАЗЦОВ, ОТЛИТЫХ В КОКИЛЬ «РОЖКОВОЙ» И «ГРЕБЕШКОВОЙ»
ФОРМ СПЛАВА АМ4,5Кд**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE HOMOGENEITY OF CHEMICAL COMPOSITION
OF CHILL-CAST SAMPLES OF THE "HORN" AND "SCALLOPED" FORMS
OF THE AM4,5Kd ALLOY**

Якимов Виктор Иванович – доктор технических наук, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 52-63-17.
Mr. Victor I. Yakimov – Doctor of Engineering, JSC Yuri Gagarin Aviation Plant (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 52-63-17.

Паниван Галина Евгеньевна – инженер-технолог, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 52-63-17.
Ms. Galina Ye. Panivan – process-control engineer, JSC Yuri Gagarin Aviation Plant (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 52-63-17

Муравьев Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: VMuravyev@mail.ru.
Mr. Vassily I. Muravyev – Doctor in Engineering, Professor, Chief Research Fellow, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: VMuravyev@mail.ru

Захарова Елена Викторовна – инженер-технолог, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 52-63-17.
Ms. Elena V. Zakharova – process-control engineer, JSC Yuri Gagarin Aviation Plant (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 52-63-17.

Куриный Владислав Викторович – кандидат 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. Vladislav V. Kurinij – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru

Аннотация. В статье описываются результаты исследований особенностей изготовления литьём в кокиль отливок «гребешковой» и «рожковой» формы из сплава АМ4,5Кд.

Summary. The paper presents the results of a study of the process of chill casting of the “horn” and “scallop” forms of the AM4,5Kd alloy.

Ключевые слова: кокиль, форма, химический состав, AL-Si сплавы.

Key words: chill cast, mould, chemical composition, AL-Si alloys.

УДК 669.714.7

В ранее проведенных работах [1; 2] отмечалось о равномерности распределения химических элементов по всей длине образца для Al-Si-сплавов при получении СОП (стандартные образцы предприятия) в кокиль «гребешковой» формы [3].

Анализ химического состава образцов из сплава АМ4,5Кд рассматривался по распределению меди в объеме образцов, отлитых в кокиль «рожковой» и «гребешковой» форм.

Приготовление сплава осуществляли по серийной технологии: расплавление шихты; при температуре 730-740 °С рафинирование хлористым марганцем и дегазирующей таблеткой «Эвтектика»; обработка покровным флюсом калий гексафторцирконатом (K_2ZrF_6); выстаивание.

Перед заливкой образцов на химический анализ кокиль прогревали до температуры 150-200 °С и окрашивали кокильной краской. Заливку образцов проводили при температуре 710-720 °С в середине разливки расплава мерным ковшом.

Проверка химического состава образцов выполнялась согласно ГОСТ 7727-81 спектральным методом на приборе МФС-8 с фотоэлектрической регистрацией спектра в зонах согласно выбранной схеме.

Градуировочные графики строились по стандартным образцам алюминиевого сплава АМ4,5Кд, комплект 8 (81-85), ОСТ 1.90004-79. Вместе с образцами проводили анализ по распределению меди СОП 682, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение меди в СОП 682

Номер эталона	Номер плавки	Аттестованное значение образца	Массовая доля, %	Средний результат
682	89	4,75	4,8-4,7-4,7-4,8	4,75
682	90	4,75	4,7-4,8-4,8-4,7	4,75
682	92	4,75	4,8-4,7	4,75
682	95	4,75	4,8-4,7-4,7	4,75
682	97	4,75	4,8-4,8-4,7	4,75
682	98	4,75	4,8-4,8-4,7-4,7	4,75
682	99	4,75	4,7-4,8	4,75

Для сравнения с результатами спектрального анализа образцы, отлитые в кокиль «рожковой» и «гребешковой» формы, направлялись в лабораторию для проведения арбитражного анализа на содержание меди электрогравиметрическим методом по ГОСТ 11739.12-89.

Определение химического состава в образцах отлитых в кокиль «рожковой» формы, проводили по трем точкам, показанным на рис. 1. Результаты анализа приведены в табл. 2.

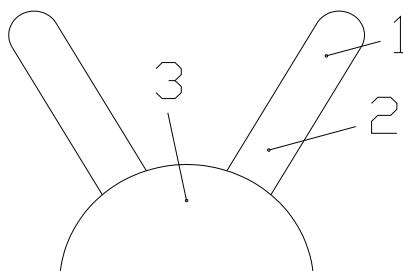


Рис. 1. Образец, отлитый в кокиль «рожковой» формы

Распределение меди в образце, отлитого в кокиль «рожковой» формы

Определяемый элемент	Номер плавки	Массовая доля, %	Среднее содержание
Cu	89-1	4,5 – 4,6 – 4,7 – 4,7 – 4,7	4,6
	89-2	5,0 – 5,0 – 4,7 – 4,8 – 4,9	4,9
	89-3	5,0 – 5,0 – 5,0 – 5,0	5,0
Cu	90-1	4,5 – 4,6 – 4,6 – 4,4	4,5
	90-2	4,6 – 4,8 – 4,6 – 4,8	4,7
	90-3	4,7 – 4,8	4,8
Cu	92-1	4,6 – 4,7 – 4,5 – 4,5	4,6
	92-2	4,4 – 4,3	4,4
	93-3	5,2 – 5,1	5,2
Cu	95-1	4,4 – 4,6 – 4,3 – 4,5 – 4,4	4,4
	95-2	4,1 – 4,2 – 4,2 – 4,0	4,1
	95-3	4,9 – 4,8	4,8
Cu	97-1	4,2 – 4,1 – 4,2	4,2
	97-2	4,1 – 4,1	4,1
	97-3	4,8 – 4,5	4,6
Cu	98-1	4,6 – 4,5 – 4,4 – 4,4	4,5
	98-2	4,5 – 4,3 – 4,8	4,5
	98-3	4,8 – 4,6	4,7
Cu	99-1	4,1 – 4,4 – 4,4 – 4,0 – 4,3	4,2
	99-2	4,4 – 4,4 – 4,1 – 4,3 – 4,3	4,3
	99-3	4,6 – 4,6 – 4,3	4,5

Полученные результаты имеют низкую сходимость и являются некорректными, что характеризует неоднородное распределение меди в объеме образцов, отлитых в кокиль «рожковой» формы.

Определение химического состава в образцах, отлитых в кокиль «гребешковой» формы, проводили по двум точкам определения. На рис. 2 показан один образец из восьми, отлитый в «гребешковую» форму. Результаты анализа приведены в табл. 3.



Рис. 2. Образец, отлитый в кокиль «гребешковой» формы

Полученные результаты имеют высокую сходимость, что характеризует равномерное распределение меди по всему объему образцов, отлитых в кокиль «гребешковой» формы.

Сводные данные результатов анализов по меди образцов, отлитых в кокиль «рожковой» формы, кокиль «гребешковой» формы, и результаты химического анализа приведены в табл. 4.



Распределение меди в образце, отлитого в кокиль «гребешковой» формы

Определяемый элемент	Номер плавки	Массовая доля, %	Среднее содержание	Средние результаты
Cu	95 – 1 – 1	4,6 – 4,7	4,6	4,5
	95 – 1 – 2	4,5 – 4,5 – 4,4	4,5	
	95 – 2 – 1	4,6 – 4,5	4,5	
	95 – 1 – 2	4,2 – 4,3	4,3	
	95 – 3 – 1	4,3 – 4,4	4,4	
	95 – 3 – 2	4,5 – 4,5 – 4,7	4,6	
	95 – 4 – 1	4,4 – 4,4	4,4	
	95 – 4 – 2	4,5 – 4,5 – 4,6	4,5	
Cu	97 – 1 – 1	4,5 – 4,6 – 4,6	4,6	4,6
	97 – 1 – 2	4,4 – 4,6 – 4,5	4,5	
	97 – 2 – 1	4,5 – 4,5	4,5	
	97 – 2 – 2	4,5 – 4,6 – 4,7	4,6	
	97 – 3 – 1	4,6 – 4,6 – 4,7	4,6	
	97 – 3 – 2	4,6 – 4,5 – 4,6	4,6	
	97 – 4 – 1	4,4 – 4,6 – 4,7	4,6	
	97 – 4 – 2	4,6 – 4,7 – 4,6	4,6	
	97 – 5 – 1	4,5 – 4,6 – 4,6 – 4,4	4,6	
	97 – 5 – 2	4,5 – 4,5 – 4,4	4,5	
	97 – 6 – 1	4,9 – 4,4 – 4,7 – 4,7	4,7	
	97 – 6 – 2	4,5 – 4,6 – 4,6	4,6	
	97 – 7 – 1	4,8 – 4,7 – 4,6 – 4,5	4,7	
	97 – 7 – 2	4,6 – 4,6 – 4,5	4,6	
Cu	98 – 1 – 1	4,6 – 4,7	4,6	4,5
	98 – 1 – 2	4,3 – 4,4 – 4,3 – 4,6	4,4	
	98 – 2 – 1	4,8 – 4,5 – 4,7	4,6	
	98 – 2 – 2	4,4 – 4,8 – 4,4 – 4,5	4,5	
	98 – 3 – 1	4,6 – 4,6 – 4,6	4,6	
	98 – 3 – 2	4,4 – 4,4 – 4,4 – 4,5	4,4	
	98 – 4 – 1	4,7 – 4,5 – 4,6	4,6	
	98 – 4 – 2	4,3 – 4,5 – 4,4	4,4	
	98 – 5 – 1	4,5 – 4,5 – 4,8	4,6	
	98 – 5 – 2	4,3 – 4,3 – 4,5 – 4,6	4,5	
Cu	99 – 1 – 1	4,5 – 4,5	4,5	4,5
	99 – 1 – 2	4,3 – 4,7 – 4,4 – 4,3	4,4	
	99 – 2 – 1	4,4 – 4,7 – 4,4 – 4,7	4,6	
	99 – 2 – 2	4,5 – 4,5 – 4,6	4,5	
	99 – 3 – 1	4,3 – 4,5 – 4,7 – 4,3	4,5	
	99 – 3 – 2	4,4 – 4,4 – 4,5	4,4	
	99 – 4 – 1	4,3 – 4,6 – 4,4	4,4	
	99 – 4 – 2	4,3 – 4,6 – 4,4	4,4	
	99 – 5 – 1	4,5 – 4,5 – 4,5	4,5	
	99 – 5 – 2	4,5 – 4,5 – 4,6	4,5	
	99 – 6 – 1	4,7 – 4,6	4,6	
	99 – 6 – 2	4,4 – 4,4	4,4	

Сводные данные результатов анализов по меди образцов, отлитых в кокиль «рожковой» и «гребешковой» формы

Номер плавки	Массовая доля меди в сплаве, %		
	«Рожковая» форма	«Гребешковая» форма	Химический анализ
95 -- 1	4,4	4,5	4,6
95 – 2	4,1		
95 -- 3	4,8		
97 -- 1	4,2	4,6	4,6
97 – 2	4,1		
97 -- 3	4,6		
98 -- 1	4,5	4,5	4,5
98 – 2	4,5		
98 -- 3	4,6		
99 -- 1	4,2	4,5	4,5
99 – 2	4,3		
99 -- 3	4,5		

Выводы:

1 Образцы, отлитые в кокиль «рожковой» формы, имеют неоднородный химический состав.

2 Образцы, отлитые в кокиль «гребешковой» формы, имеют однородный химический состав.

3 Спектральный анализ химического состава сплава из материала АМ4,5Кд необходимо проводить на образцах, отлитых в кокиль «гребешковой» формы.

На основании проведенной работы и полученных выводов был изготовлен и внедрен в производство четырехместный кокиль «гребешковой» формы (для отливки стандартных образцов использовался восьми местный кокиль).

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование структуры и химической однородности производственного спектрального эталона из Al-Si-сплавов / В. И. Муравьев, В. А. Решетникова, В. И. Якимов, Г. Е. Панван, М. А. Заплетин // *Металлургия машиностроения*. – 2009. – № 4. – С. 40-43.
2. Свиридов, А. В. Математическое моделирование формирования физико-механических свойств электрофоретических литейных форм / А. В. Свиридов, В. В. Куриный // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2012. – № II-1(10). – С. 78-80.
3. Пат. № 2188741 RU. МКИ В 22 D 15/04. Кокиль для отливки стандартных образцов / В. И. Муравьев, В. И. Якимов, С. З. Лончаков, А. В. Якимов. Заявка № 2000123579/02; заявл. 13.09.2000; Опубл. 10.09.2002. Бюл. № 25.

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ
FLEET AND SHIPBUILDING

Тарануха Н. А., Худяков С. А.
N. A. Taranukha, S. A. Khudiakov

**УЧЕТ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОВЫХ МЕХАНИЗМОВ В МКЭ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ФИКТИВНЫХ» КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**TAKING ACCOUNT OF SHIP GEAR FLANGE COUPLINGS FOR CALCULATION
IN FEM USING FICTITIOUS-DOMAIN FINITE ELEMENTS**



Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; (4217) 24-11-42. E-mail: taranukha@knastu.ru
Mr. Nikolay A. Taranukha – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Shipbuilding Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Str.; (4217) 24-11-42. E-mail: taranukha@knastu.ru



Худяков Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского (Россия, Владивосток); 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 44, кв. 120; 8-924-239-55-51.
Mr. Sergei A. Khudiakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Professor at Admiral G.I.Nevelsky State Maritime University (Russia, Vladivostok); 690003, Vladivostok, 44, Verkhneportovaya Str.; 8-924-239-55-51.

Аннотация. Данная работа посвящена способу учета фланцевых соединений при расчетах частот свободных колебаний сложных судовых упругих систем типа «дизель-днище». Фланцевые соединения, состоящие из нескольких деталей, обладают большой податливостью. Для расчета таких систем широко используется метод конечных элементов. При этом предлагается использовать «фиктивные» конечные элементы, аппроксимирующие три конструктивных элемента фланца: пластину лафетной полосы, болт и пластину лапы дизеля. Полученные с использованием фиктивных конечных элементов частоты хорошо согласуются с результатами натурных экспериментов.

Summary. The paper proposes a method for taking account of flange couplings for the purposes of calculating free frequencies of such complicated elastic ship systems as "diesel engine - bottom". Flange couplings consisting of more than one part demonstrate considerable pliability. For calculation of such systems the FEM method is widely used. We propose to use fictitious-domain finite elements to approximate three structural elements of a flange: the plate of the mounting strip, the bolt, and the plate of the diesel engine foot. The frequencies obtained using fictitious-domain finite elements agree very well with the results of full-scale experiments.

Ключевые слова: кораблестроение, фланцевые соединения, метод конечных элементов, «фиктивные» конечные элементы, вибрация, частоты.

Key words: naval architecture, flange couplings, finite element method, fictitious-domain finite elements, vibration, frequency.

УДК [621.436:629.5]:534.282

Введение. Первые расчеты

Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из наиболее эффективных методов расчета динамической прочности сложных конструкций. При использовании его исходная конструкция заменяется совокупностью дискретных элементов, при этом соблюдается равенство кинетической и потенциальной энергии конструкции и её дискретной модели, представленной совокупностью конечных элементов.

Для некоторых конструкций (особенно сварных с ортогонально расположенными элементами) удается получить дискретную модель, точно описывающую исходную физическую модель типа ферм и перекрытий при статических расчетах. В общем случае динамических расчетов модель лишь приближенно отражает поведение и геометрию исследуемой конструкции, при этом уменьшение размеров элементов и увеличение их количества, как правило, приводит к повышению точности решения и лучшему описанию высших форм свободных колебаний упругой системы.

Первые расчеты собственных частот и форм колебаний судовых упругих систем типа «дизель-днище» (ДД) выполнялись по МКЭ под руководством В.В. Козлякова и Э.П. Лукаша с использованием программы «Динамика» на ЕС ЭВМ в 1977-1978 гг. Данная программа давала возможность выполнять расчет частот и форм свободных колебаний с числом элементов до 200 и шириной ленты матрицы результирующей системы уравнений не более 90.

Современные представления о расчете по МКЭ системы дизель-днище

Применение конечно элементных процедур получило большое распространение. При этом используются как классический МКЭ, так и его модификации, в частности метод модуль-элементов [2].

В случае применения классического МКЭ при построении расчетной модели следует учитывать сложный характер рассматриваемой упругой системы, состоящей из силовой установки, корпусных конструкций и дополнительных связующих элементов. В ряде случаев в состав реальной системы «силовая установка – судовой корпус» входят упругие амортизирующие элементы, обеспечивающие достаточно большие перемещения и изготовленные из нестандартизированных материалов и устройств. В этом случае расчет таких систем ещё больше усложняется за счет нетривиального определения жесткостных характеристик подобных элементов [16; 17; 18; 19; 20]. Однако в данной статье такие сложные системы не рассматриваются.

В статье рассматривается расчетная схема типа ДД для расчета частот и форм свободных колебаний. При этом соблюдаются общие требования МКЭ, а также учитываются возможности используемой программы. Структура упругой системы рассматривается достаточно подробно (см. рис. 1):

- днище рассматривается как сварная корпусная конструкция (может быть аппроксимирована пластинчатыми или стержневыми элементами);
- остов дизеля (рассматриваются только малооборотные дизели (МОД)) имеет сварные конструкции, соединенные между собой фланцами (между блоками цилиндров и картерными стойками или блок-картерами и фундаментной рамой).

Все данные конструкции в целом стянуты анкерными связями, фундаментная рама устанавливается на клиньях и закрепляется на судовом фундаменте с помощью болтов, как показано на рис. 2. Поэтому в отношении днища проблем не возникает. Что касается остова МОД, в расчетных схемах приняты следующие конечные элементы:

- пластинами аппроксимированы блоки цилиндров (литые стальные конструкции совместно с втулками и крышками цилиндров), а также поперечные секции фундаментных рам;
- стержнями – картерные стойки.

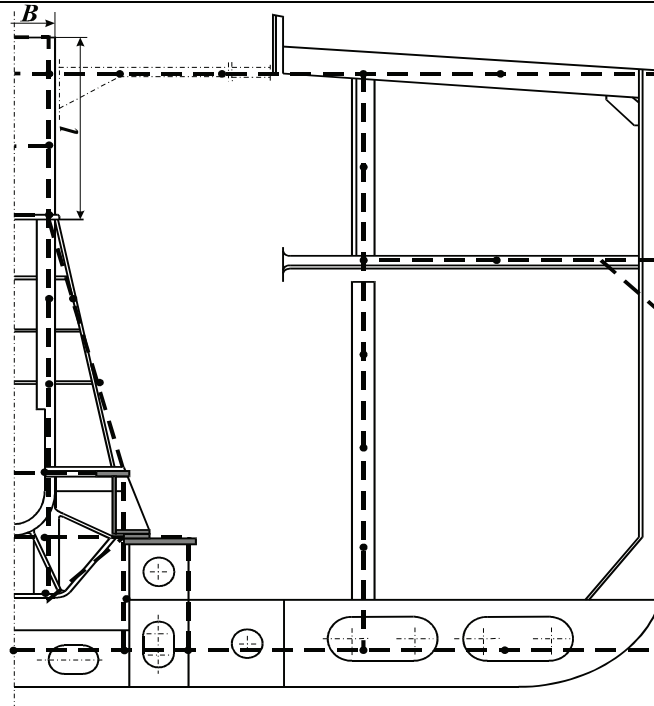


Рис. 1. К составлению расчетной схемы МКЭ системы «дизель-днище» т/х «Беломорсклес»

Композицию стержневых и пластинчатых элементов целесообразно применять с целью учета структуры основных несущих связей корпуса и остова дизеля. Например, рам в машинных отделениях (МО) и жестких и массивных конструкций МОД (блоков цилиндров и фундаментных рам, как рассматривалось выше).

В целом расчетная схема системы ДД сохраняет геометрическое подобие модели и имеет граничные условия, соответствующие реальным условиям работы конструкций корпуса и остова дизеля.

При составлении расчетной схемы системы ДД целесообразно рассматривать весь блок МО со всеми конструкциями корпуса и механизмами как единую пространственную систему с шестью степенями свободы в узлах [3; 4; 5; 7; 8; 9]. Однако многие исследователи упрощают модель и ограничиваются анализом только совместных колебаний днища и остова МОД, например, как показано на рис. 1 [10; 11; 12; 13; 14]. Такое упрощение ранее было связано, прежде всего, с возможностями компьютеров в решении больших систем линейных уравнений, описывающих расчетные схемы, а также сложностью в подготовке исходных данных при выполнении расчетов.

Тем не менее это оправдывало основную цель – определение спектра свободных колебаний основной системы ДД, что необходимо для расчетов вынужденных колебаний самого МОД и упругих подсистем в МО только на спецификационных режимах работы гребной установки.

Об учете фланцевых соединений

Для учета жесткостных и инерционных свойств смежных конструкций, например, перекрытий днища соседнего отсека и бортов, могут быть введены определенные граничные условия. В случаях применения фланцевых соединений, например, соединение фундаментной рамы МОД с судовым фундаментом (см. рис. 2), в расчетную схему могут вводиться специальные «фиктивные» конечные элементы, аппроксимирующие собой сразу три конструктивных элемента: пластину лафетной полосы фундамента, болты и лапу фундаментной рамы

МОД. Характеристики этих фиктивных элементов (ФЭ) должны определяться специальным расчетом (суммированием податливостей все трех конструктивных элементов).

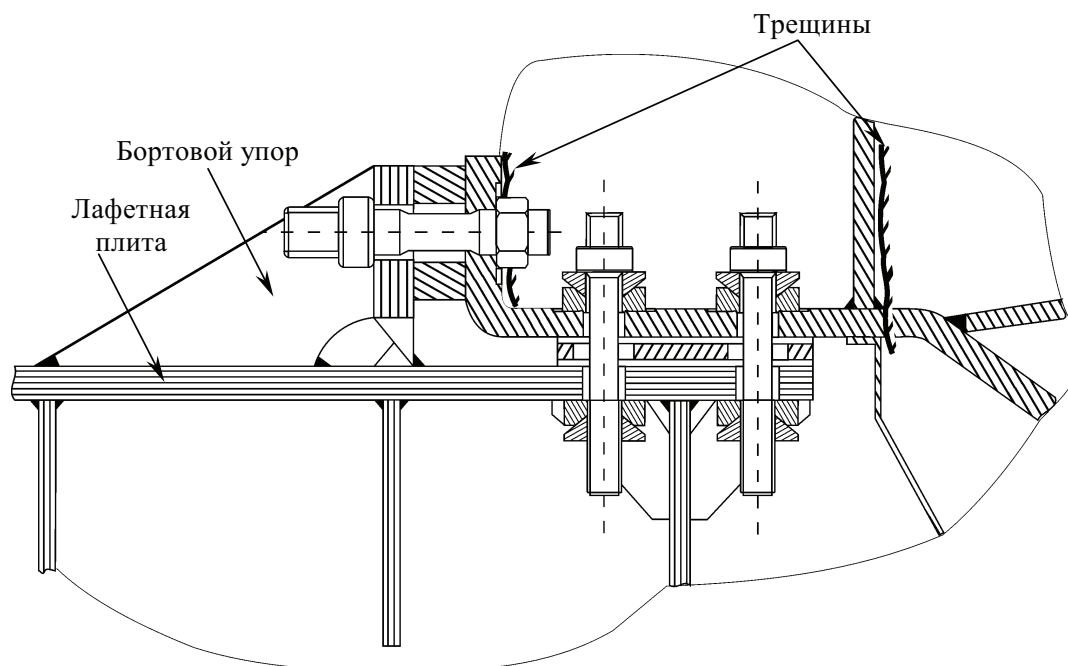


Рис. 2. Фланцевое соединение МОД типа 6ДКРН74/160-3 с судовым фундаментом на т/к «Самотлор». Указанные трещины имели место на всех танкерах серии

При составлении расчетной схемы анализируемая конструкция разбивается на конечные элементы, узлы которых вводятся в местах изменения жесткостных, инерционных характеристик или резкого изменения формы (кривизны, надлома). Размеры конечных элементов должны выбираться в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [14].

Композиция конечных элементов должна четко описывать высшую форму колебаний упругой системы (анализируемой конструкции), которую необходимо получить в результате расчета.

Нумерация узлов производится таким образом, чтобы получилась минимальная ширина ленты результирующей системы уравнений, что достигается при последовательном обходе узлов схемы вдоль её меньшего размера (по количеству элементов).

Конечные элементы нумеруются в соответствии с возрастанием номеров узлов по группам с одинаковыми параметрами, что облегчает формирование отдельных массивов исходных данных и сокращает их объем.

При кормовом расположении МО система ДД образуется конструкциями с нерегулярным расположением связей в блоке МО и поэтому является наиболее сложной при описании. Только при среднем расположении МО по длине судна (в районе цилиндрической вставки корпуса) система сохраняет регулярность по длине и значительно проще описывается.

Наличие взаимосвязи между частотами данных форм дает возможность оценивать любую из них по одной известной и при необходимости производить уточненный расчет данной формы (особенно при условиях резонанса).

Для упругой системы составление расчетной схемы производится после выбора физической модели и определения характеристик сечений отдельных конструкций (связей), т.е. моментов инерции, площадей сечений и инерционных характеристик с учетом присоединенных масс воды для элементов в подводной части корпуса судна [10].

На рис. 3 приведена расчетная Н – форма колебаний системы ДД для т/х «Беломорсклес» (во втором варианте расчета введены связи верхнего крепления блока цилиндров). При этом расчетная частота составила $f_H = 8.7$ Гц (на частоте вращения 104 мин^{-1} , порядок колебаний $\nu = 5$).

В реальных условиях резонанс Н – формы колебаний системы ДД на судах этой серии был расположен в диапазоне частот $7.7 - 8.0$ Гц (или при 93 и 96 мин^{-1} в грузу и в балласте). Поэтому смещение резонанса вверх по частоте вращения за счет повышения жесткости системы (путем введения связей верхнего крепления) по результатам расчета в зону среднего хода (при $105-110 \text{ мин}^{-1}$) оказалось нежелательным. К тому же установка связей верхнего крепления остова дизеля с корпусными конструкциями на уровне главной палубы, как показано на рис. 1 и 3, была проблематичной из-за значительного расстояния и несовпадения уровня палубы и кронштейнов верхних решеток дизеля.

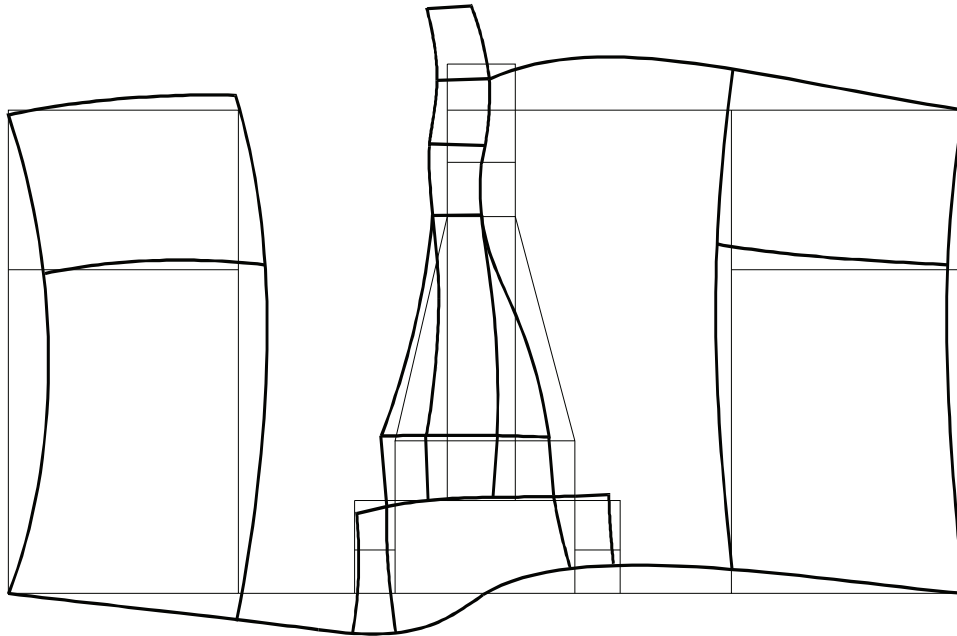


Рис. 3. Расчетная Н – форма колебаний для реальной схемы сечения МО т/х «Беломорсклес»

Решение проблемы повышенной вибрации на судах этой серии свелось к установлению «запретной зоны» в диапазоне частот вращения валопровода между малым и средним ходом, т.е. с 90 до 100 мин^{-1} , без конструктивных изменений в системе ДД.

Следует отметить, что расчетная частота f_H оказалась несколько выше, чем полученная в результате натурного эксперимента. Это объясняется тем, что в расчетной схеме не была учтена податливость фланцевого соединения фундаментной рамы МОД с судовым фундаментом (см. рис. 2).

Влияние податливости фланцевого соединения на частоты свободных колебаний продемонстрируем на примере более простой упругой системы «дизель-рама-фундамент-днище» (ДРФД) с дизелем 3А25 (3-цилиндровый, 2-тактный с мощностью 276 кВт при частоте вращения 750 мин^{-1}).

Физическая модель этой системы представлена на рис. 4, расчетная форма колебаний упругой системы (схема МКЭ) и расчетная форма колебаний – на рис. 5.

В реальных условиях резонанс в колебаниях системы ДРФД вызывал значительный по величине неуравновешенный момент 1-го порядка, действующий в продольной вертикальной плоскости XZ, с частотой $12,5$ Гц. Поэтому была принята для расчета двумерная расчетная схема. Расчетная схема МКЭ для системы ДРФД имела число элементов – 64 , чис-

ло узлов – 50, количество степеней свободы – $N = 146$. В расчетной схеме использованы конечные элементы: пластины для остова дизеля и стержни для рамы и днища МО.

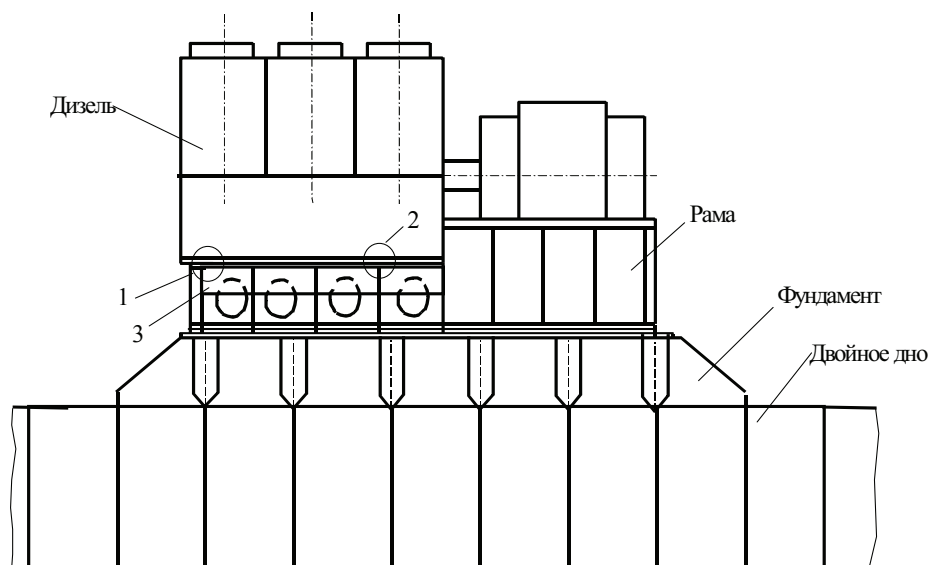


Рис. 4. Схема расположения дизель-генератора на раме и фундаменте:
1 – место расположения трещины (ЛБ); 2 – место расположения трещины;
3 – бракет, установленные для подкрепления лафетной полосы рамы

В первом варианте расчета параметры конечных элементов соответствовали фирменным размерам деталей фланцевого соединения дизеля с рамой. Во втором – параметрам элементов после усиления лафетных полос рамы (за счет установки бракет, закрывающих свободную кромку пластин, см. рис. 5) и замены болтов на болты большего диаметра.

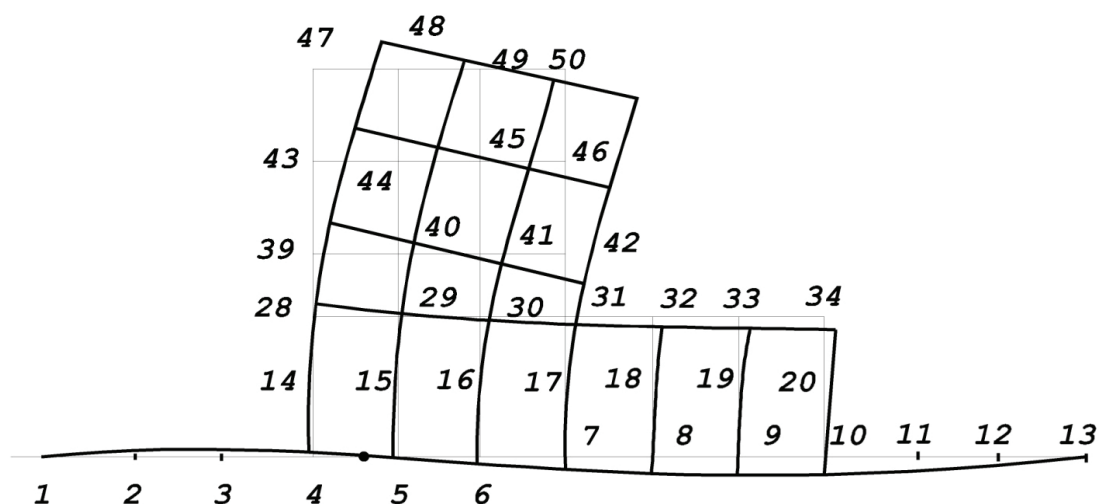


Рис. 5. Расчетная форма колебаний системы «дизель – рама – фундамент – днище»

«Фиктивные» конечные элементы

В этих расчетах впервые были использованы так называемые «фиктивные» конечные элементы, аппроксимирующие специальными элементами фланцевое соединение дизеля с рамой. Это фланцевое соединение обладало большой податливостью и явилось основной причиной резонансных колебаний двигателя на раме.

Фланцевое соединение в данной схеме МКЭ аппроксимировалось специальными «фиктивными» конечными элементами, которые представляли собой сложные составные стержни, суммарная податливость которых определялась по трём элементам: болт – пластина лафетной полосы – лапа дизеля.

При этом суммарная податливость такого специального «фиктивного» конечного элемента была равна:

$$e = e_b + e_n + e_l = 31,923 \times 10^{-8} \text{ см/Н.}$$

Здесь e_b – податливость болта, равная $e_b = L / (EF) = 5,366 \times 10^{-8} \text{ см/Н}$, здесь $L = 80 \text{ мм}$ – длина болта; $E = 2,1 \times 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости стали; $F = 7,1 \text{ см}^2$ – площадь сечения болта; e_n – податливость пластины лафетной полосы рамы, равная $e_n = C_n^{-1} = 2,265 \times 10^{-7} \text{ см/Н}$; C_n – жесткость пластины; e_l – податливость лапы дизеля, равная $e_l = L_1 / (3EJ) = 3,907 \times 10^{-8} \text{ см/Н}$; здесь $L_1 = 60 \text{ мм}$ – расчетная длина лапы дизеля; $J = bh^3 / 12 = 87,75 \text{ см}^4$ – момент инерции лапы; b – ширина лапы; h – толщина лапы. Соотношение податливостей элементов равно $e_b : e_n : e_l = 1 : 4,2 : 0,74$.

Коэффициенты жесткости «фиктивных» конечных элементов и их составляющих определялись по методике, изложенной в работе [6].

В этом случае относительная податливость фланцевого соединения оказалась равной $e_0 = e / e_b = 5,95$.

Тогда, принимая длину элемента-болта, равную $L_0 = 0,16 \text{ м}$ (в соответствии с требованиями МКЭ), площадь сечения редуцируется по формуле $F_0 = nFL_0 / (Le_0)$.

Момент инерции сечения стержней значительно завышен с целью предотвращения их изгиба, который в реальных условиях исключается за счет сил трения между контактными поверхностями (болты работают только на растяжение, сжатие исключено конструктивно – это должно учитываться в программе, реализующей МКЭ).

Для 2-го варианта расчета (после усиления фланцевого соединения) сечение болтов увеличено на 44 % (болты М30 заменены на М36) и жесткость пластин лафетной полосы увеличена почти в два раза за счет установки бракет (см. рис. 5), что устранило свободную кромку пластин лафетной полосы и существенно повысило жесткость фланцевого соединения в целом.

Таким образом, характеристики конечных элементов, аппроксимирующих фланцевое соединение, были следующими: длина равна расчетной длине болта; площадь сечения КЭ определялась расчетом по податливости всех трех элементов (болт – пластина лафетной полосы – лапа дизеля); момент инерции сечения конечных элементов завышался на порядок с целью исключения изгиба, что в реальных условиях недопустимо из-за трения между контактирующими поверхностями (лапы дизеля и поверхность лафетной полосы рамы). В таком случае суммарная податливость всех элементов оказалась значительно больше (в нашем случае в 5,9 раза) по сравнению с болтом [15].

Результаты расчетов

В результате расчетов получены следующие частоты первых двух форм свободных колебаний:

- в первоначальном варианте (после постройки судна): $f_1 = 15,5 \text{ Гц}$, $f_2 = 32,5 \text{ Гц}$;
- после модернизации (после подкрепления): $f_1 = 18,5 \text{ Гц}$, $f_2 = 43,3 \text{ Гц}$.

Начальный вариант расчета рассматриваемой здесь системы, в котором не учитывалась повышенная податливость фланцевого соединения, дал завышенные частоты свободных колебаний системы ($f_1 = 21,3 \text{ Гц}$, $f_2 = 47,8 \text{ Гц}$), что не согласовалось с данными эксперимента, т.е. результатами измерений вибрации. Поэтому использование «фиктивных» конечных элементов с редуцированными жесткостными характеристиками в данном случае оказалось оправданным и целесообразным, так как они учитывают реальную податливость фланцевого

Тарануха Н. А., Худяков С. А.

УЧЕТ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОВЫХ МЕХАНИЗМОВ В МКЭ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ФИКТИВНЫХ» КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

соединения. На расчетной форме колебаний (см. рис. 5) видны значительные деформации «фиктивных» конечных элементов (между узлами: 28-38, 29-40, 30-41 и 31-42), обладающих большой податливостью по сравнению с остальными элементами упругой системы. Для повышения жесткости пластин лафетных полос фундаментов под МОД устанавливаются ребра жесткости (см. рис. 4).

Заключение

Из результатов расчетов частот свободных колебаний упругой системы «дизель – рама – фундамент – днище» следует, что введение «фиктивных» элементов в расчетную схему МКЭ дает возможность учесть податливость фланцевого соединения и дает более точный результат. В рассмотренном случае снижение расчетной частоты произошло более чем на 30 %, что практически совпало с действительной, определенной при измерениях вибрации.

Амплитуды вертикальной вибрации верхней носовой части блока цилиндров (узел 47 на рис. 5) значительно превышали допустимое значение. При этом кривая развития амплитуд свидетельствовала о предрезонансной зоне, т.е. $f_1 > f_b$ (частоты возмущающего момента 1-го порядка). Разница частот составляла около 20 %. После усиления фланцевого соединения эта разница увеличилась более, чем на 30 % и уровень вибрации снизился и не превышал предельно допустимого значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарануха, Н. А. Динамика упругих систем в машинных отделениях судов с главными малооборотными дизелями / Н. А. Тарануха, С. А. Худяков // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 2012. – № 67 (351). – С. 161-168.
2. Постнов, В. А. Оценка напряженно-деформированного состояния корпуса судна методом модуль-элементов / В. А. Постнов, Н. А. Тарануха // Судостроение. – 1983. – № 5. – С. 5-8.
3. Худяков, С. А. Обеспечение вибростойкости конструкций машинных отделений теплоходов / С. А. Худяков // Судостроение. – 1982. – № 3. – С. 42-45.
4. Худяков, С. А. Особенности вибрации судовых малооборотных дизелей / С. А. Худяков // Рукопись депонирована ЦНИИ «Румб», 1985, ДР-2221. – 12 с.
5. Худяков, С.А. Проблемы вибрации судов Дальневосточного бассейна / С. А. Худяков // Сборник докладов международной конференции «Проблемы прочности и эксплуатационной надежности судов». – Владивосток, 1996. – С. 310-317.
6. Вайнберг, Д. В. Расчет пластин / Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. – Киев: Будивельник, 1970. – 435 с.
7. Asmussen, I. Design of Ships Fitted with Two-stroke Engines in View of Low Vibration Level / I. Asmussen, H. Munn // PRADS'92, 1992, v.1. – P. 1374-1387.
8. Fujii, K. IHI Ship Vibration Measuring and Analyzing System and its Application Results / K. Fujii, Y. Okada // Japan Shipbuilding and Marine Engineering, 1978, v.12, №1. – P. 23-35.
9. Misuuchi, M. Analysis of Transverse Vibration of Actual Engine Frames / M. Misuuchi, M. Nagai // Inter. Symp. Mar. Eng., Tokyo, 1973, – P. 41D-52D.
10. Худяков, С. А. Совместные колебания судовых главных дизелей с конструкциями корпуса / С. А. Худяков // Эксплуатация судов в Тихоокеанском бассейне. – Владивосток: НТО им. акад. А.Н. Крылова, 1981, вып. 218. – С. 81-99.
11. Chang, J. Dynamic response Prediction of Rolling Stays / J. Chang, W. Wang, R. Shyu, W. Yeih // Journal of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1997, v. 16, № 4. – P. 51-61.
12. Durnev, M. Analysis of Vibration of Marine Diesel Generators with Vibroinsulators / M. Durnev, S.Khoodiakov // Proceedings TEAM'2000. – Vladivostok, 2000. – P. 517-518.
13. Fisher, G. Von Hauptmotor erregts Schiffsschwinungen / G. Fisher // Schiff und Hafen, 1977, 29, № 12. – S. 1129-1132.
14. Shyn, R. Vibration Analysis and Measurement of a Rolling Stay / R. Shyn // Journal of the Chinese Institute of Engineers, 1996, v. 19, № 3. – P. 401-408.



15. Худяков, С.А. Особенности расчета судовых конструкций с фланцевыми соединениями / С. А. Худяков // Повреждения и эксплуатационная надежность судов Дальневосточного бассейна. – Владивосток: НТО им. акад. А.Н. Крылова, 1986, вып. 15. – С. 43-47.
16. Тарануха, Н. А. Математическая модель деформирования упругой связи из нестандартизированного материала для динамической системы с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – Т. 1, № 5. – С. 4-9.
17. Тарануха, Н. А. Колебания динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – Т. 1, № 3. – С. 4-11.
18. Тарануха, Н. А. Определение жесткостной характеристики нестандартизированного материала упругой связи динамической системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – Т. 1, № 4. – С. 4-11.
19. Любушкина, Н. Н. Программно-информационное обеспечение задачи о колебаниях стержня с большими деформациями / Н. Н. Любушкина, А. Н. Петрова, Н. А. Тарануха // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С. 30-39.
20. Математическая модель шарнирно-стержневой системы с большими перемещениями узлов / Н. А. Тарануха, К. В. Жеребко, А. Н. Петрова, М. Р. Петров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 3.– С. 12-18.

Красильникова С. Д.
S. D. Krasilinikova

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ДОРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОКОВ НА ОАО «КнААПО»**

**RESULTS OF LABORATORY TESTS AND FIELD STUDIES AIMED AT THE IM-
PROVEMENT OF THE PROCESS DESIGN USED TO TREAT PLATING WASTES AT
JSC "YURI GAGARIN AVIATION PLANT"**

Красильникова Светлана Дмитриевна – начальник очистных сооружений Открытого акционерного общества «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1. E-mail: sdkr1@mail.ru

Ms. Svetlana D. Krasilinikova – Chief of the Waste Treatment Facility at JSC Yury Gagarin Aviation Plant (city of Komsomol-on-Amur) 681018, Komsomol-on-Amur, 1, Sovetsjaya Str. E-mail: sdkr1@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты лабораторных и натурных исследований по доработке технологической схемы очистки гальванических стоков ОАО «КнААПО» с использованием различных вариантов фильтрации. Рассмотрен вариант реконструкции фильтров.

Summary. The paper considers the results of laboratory tests and field studies aimed at the improvement of the design of processes used to treat galvanic wastes at JSC "Yuri Gagarin Aviation Plant" relying on different types of filtration. A version of such filter redesign is proposed.

Ключевые слова: гальванические стоки, фильтрации, напорные фильтры, сорбент, статистическая емкость, динамическая емкость, коэффициент очистки.

Key words: galvanic wastes, filtering, pressure filters, sorbent, statistical capacity, dynamic capacity, decontamination factor.

УДК 581.5

Введение. Задача очистки стоков промышленных предприятий является важной с точки зрения защиты окружающей среды, в частности, рек и водохранилищ, используемых для питьевого водоснабжения, и, особенно, водоемов рыбохозяйственного значения.

Один из основных источников загрязнения почвы, водоемов, водоносных горизонтов и сельскохозяйственных угодий тяжелыми металлами – сточные воды и шламы гальванических производств. Известные методы очистки технологических стоков сводятся к их переработке в гидроксиды тяжелых металлов и выделению в виде осадка очистных сооружений. При неэффективной очистке гальваностоков тяжелые металлы попадают в природные водоемы, почву и по трофическим путям питания доходят до человека.

Способы и технологические схемы обработки гальваностоков постоянно совершенствуются и обновляются. В качестве примеров можно привести патенты последних лет, посвященные очистке стоков от тяжелых металлов и, в частности, гальваностоков. Так авторы патента [3] предлагают способ получения сорбента с металлсульфидным поглощающим слоем для использования в качестве фильтрующего материала при обработке стоков. Патент [4] посвящен свойству штамма бактерий *Desulfovibrio vulgaris* ЭГАСТ-5, позволяющему повысить эффективность очистки сточных вод гальванического производства от ионов тяжелых металлов до 99,9 %. Способ очистки сточных вод от трехвалентных соединений хрома защищается авторами в патенте [5] и так далее.



Все эти способы имеют ряд преимуществ, заключающихся в новизне подхода, но и ряд недостатков с точки зрения перевода/переоборудования непрерывно работающего хозяйства по утилизации гальваносток на новый способ, сложности реализации и, наконец, затратной стоимости.

Широкое распространение для очистки сбросовых вод нашли природные и синтетические цеолиты [1, 8]. Благодаря широкой распространенности в природе и уникальной структуре, определяющей отличные сорбционные свойства по отношению ко многим загрязнителям окружающей среды, эти природные минералы давно привлекли внимание специалистов, работающих над различными проблемами прикладной экологии.

В настоящее время природные цеолиты применяются в промышленной экологии - для очистки питьевых и технических вод от ионов токсичных металлов с использованием ионообменных свойств природных цеолитов. Существует множество работ [6, 7], в которых исследована возможность использования цеолитов (в частности, клиноптилолита) с целью селективного извлечения ионов тяжелых металлов из промышленных и бытовых сточных вод. Извлечение производилось как из модельных растворов, так и из реальных сточных вод в лабораторных и промышленных условиях. В ряде работ отмечается, что клиноптилолит способен извлекать ионы таких металлов, как Cd, Co, Si, Mn, Ni, Pb, Zn, Cr из водных растворов различной концентрации. В ряде работ представлен ряд селективности клиноптилолита: $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+} > Cr^{3+} > Co^{2+} > Ni^{2+}$. В других работах он немного иной, но также ион Pb^{2+} стоит на первой позиции. Приведение цеолита в моноформу (натриевую, аммонийную и др.) повышает его сорбционную емкость по металлам.

Проведенные ОАО «КнААПО» исследования в рамках договора с Институтом химии ДВО РАН (г. Владивосток) преследовали цели доработки уже существующей технологической схемы очистки сточных вод гальванических цехов. Одним из пунктов проведенных исследований и натурных испытаний являлась целесообразность использования цеолитов различного происхождения и рекомендации по техническим изменениям в технологической схеме очистки гальванических стоков.

Проделанная работа по описываемой теме была разбита на три этапа:

- 1) лабораторные исследования по динамической и статической емкости цеолитов по тяжелым металлам;
- 2) работы по лабораторным исследованиям процесса доочистки сбросовых вод очистных сооружений КнААПО на модельных и стабилизированных растворах;
- 3) натурные испытания сорбционной схемы доочистки сточных вод гальваносток на очистных сооружениях ОАО «КнААПО».

Результаты проведенных исследований и испытаний приведены в настоящей публикации.

Результаты исследований. Лабораторные исследования проводились с целью изучения сорбционных свойств цеолитов в статистических и динамических условиях. Использовалась зерновая фракция 1,00...0,25 мм.

Сорбцию металлов в статических условиях определяли при отношении Т:Ж = 1:1000 (50 мг цеолита на 50 000 мл раствора). Время установления равновесия – 24 ч. В качестве жидкой фазы использовались модельные растворы различного состава и концентрации. По полученным данным рассчитывали статическую сорбционную емкость (величину адсорбции) по формуле

$$\alpha = \frac{(C_{исх} - C_p) V}{m}, \quad (1)$$

где α – статистическая сорбционная емкость; $C_{исх}$ и C_p – исходная и равновесная концентрация загрязнителей соответственно; V – объем раствора; m – масса навески сорбента.

Сорбцию металлов в динамических условиях изучали на колонках диаметром 12 мм при объемной скорости потока 100 мл/ч. Сквозь неподвижный слой сорбента (навеска 2 г)

Красильникова С. Д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДОРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОКОВ НА ОАО «КНААПО»

пропускали модельные растворы. По полученным данным для построения динамических кривых коэффициент очистки рассчитывали по формуле

$$K_o = \frac{C_{исх}}{C_p}, \quad (2)$$

где K_o – коэффициент очистки в динамических условиях.

Концентрацию металлов в растворах определяли атомно-абсорбционным методом на атомно-абсорбционном и пламенно-эмиссионном спектрофотометре АА-780 (Nippon Jarrell Ash) в пламени ацетилен-воздух или ацетилен-закись азота по изготовленным в аналогичных условиях стандартам. Для устранения взаимного влияния щелочных и щелочно-земельных металлов применяли метод буферирования: к 1 мл пробы приливали 1 мл воды и 1 мл раствора KCl концентрации 10 г/л. Аналогично готовился стандартный раствор.

Количество ионов металлов в матрице цеолита определяли, обрабатывая образцы 1н раствором соляной кислоты и анализируя затем раствор атомно-адсорбционным методом. Модельные растворы готовились из хлоридов металлов.

Приведение исходного цеолита в аммонийную форму осуществлялось его обработкой 0,5 М раствором NH_4Cl в динамических условиях при объемной скорости потока 100...200 мл/ч до полного исчезновения обменных ионов в выходном растворе.

Приведение исходного цеолита в натриевую форму осуществлялось двумя способами:

1) обработкой раствором хлорида натрия (15 г/л) в динамических условиях на колонке диаметром 12 мм при объемной скорости потока 100...200 мл/ч до полного исчезновения обменных ионов в выходном растворе (Na-форма 1);

2) кипячением с концентрированным раствором карбоната натрия в течение 5 ч (Na-форма 2).

Затем цеолит отмывался дистиллятом и сушился.

Для определения возможности использования цеолита в процессах очистки сточных вод от ионов токсичных металлов были исследованы его ионообменные свойства по отношению к ряду ионов тяжелых металлов: Pb^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{+} , Cd^{+} , Si^{+} , Cr^{2+} .

При изучении ионообменных свойств был проведен эксперимент по сорбции ионов в статических условиях на исходном, т.е. не подвергнутом модификации, цеолите (см. табл. 1), который показал, что наиболее эффективно извлекались ионы свинца и кадмия.

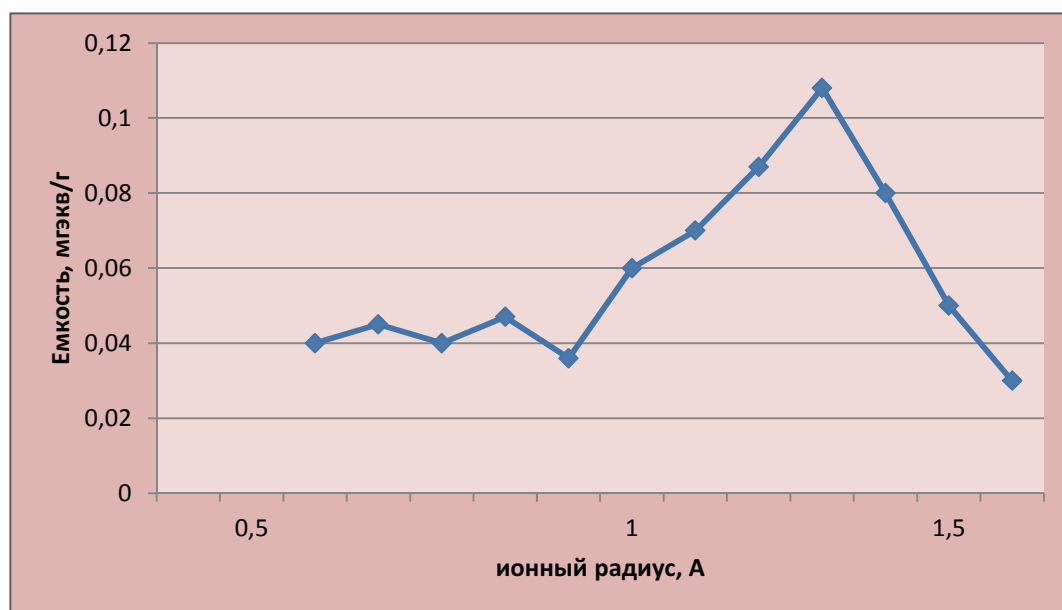


Рис. 1. Зависимость емкости от радиуса иона



Полученная зависимость емкости цеолита от размера иона (см. рис. 1) согласуется с литературными данными: это наиболее крупные катионы из всех, участвующих в эксперименте. Резкая избирательность клиноптилолита к крупным катионам может быть связана с их стабилизирующей ролью в условиях значительного уменьшения их количества во внутрикристаллическом пространстве, обусловленного уменьшением содержания тетраэдрического алюминия по сравнению с другими цеолитами.

Испытания по сорбции в статических условиях проводились вначале с растворами металлов, а также в присутствии конкурирующих ионов Ca^{2+} и Na^+ при мольном соотношении $\text{Me}/\text{Ca} = 100$ и $\text{Me}/\text{Na} = 1000$. В этих условиях эффективность извлечения значительно снизилась по всем ионам. Присутствие кальция особенно повлияло на извлечение Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} . В присутствии натрия не извлекались Cr^{3+} , Ni^{2+} .

Таблица 1

Сорбционная емкость в статических условиях

Наименование металла	Исходная концентрация мг/л	Емкость в различных формах цеолита (мг/л)			
		исходный	NH_4^+ -форма	Na^+ -форма	Na^+ -форма
Pb	10,0	8,2	9,4	7,8	8,6
Pb/Ca	10/190	2,0	5,8	6,1	9,0
Pb/Na	10/1100	3,8	6,2	6,4	6,6
Cr	5,0	1,0	1,5	1,1	0,8
Cr /Ca	5/385	0,5	0,5	0,3	1,1
Cr /Na	5/2200	0,0	0,5	0,5	1,1
Ni	5,0	1,2	2,7	2,2	2,1
Ni /Ca	5/350	0,5	0,0	0,0	0,7
Ni /Na	5/1950	0,0	0,0	0,2	1,3
Mn	5,0	1,0	4,8	4,9	1,5
Mn /Ca	5/360	0,4	0,4	0,7	0,8
Mn /Na	5/2100	0,2	0,3	0,1	0,5
Cu	5,0	1,5	4,7	4,9	4,2
Cu /Ca	5/325	0,0	1,0	0,8	2,4
Cu/Na	5/1800	0,6	0,9	0,8	4,3
Cd	10,0	4,0	8,0	7,8	7,5
Cd /Ca	10/360	0,2	0,6	0,4	0,8
Cd /Na	10/2000	0,6	0,0	0,0	0,6

Для сравнения аналогичные эксперименты были проведены с цеолитом Чугуевского месторождения, который широко используется в водоочистке. Из табл. 2 видно, что Вангинский клиноптилолит не уступает Чугуевскому по емкости, во многих случаях он даже лучше.

Таблица 2

Сравнение сорбционных свойств цеолитов

Металл	Емкость, мг/г	
	Вангинский	Чугуевский
Cd	4,0	3,8
Ni	1,2	1,1
Cr	1,0	1,0
Pb	8,2	7,6
Mn	1,0	2,0

Красильникова С. Д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДОРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОКОВ НА ОАО «КНААПО»

В ходе работы была проведена модификация цеолита. Исходный цеолит был переведен в аммонийную и натриевую формы. Результаты эксперимента по сорбции целевых ионов приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что емкость цеолита увеличилась по отношению ко всем исследованным металлам, в том числе и в присутствии конкурирующих ионов. Это не противоречит обширным литературным данным, исходя из которых следует, что приведение цеолита в моноформу повышает его обменную емкость и, соответственно, эффективность извлечения ионов.

Традиционно при исследовании возможности практического применения сорбента в качестве фильтрующей загрузки проводится его испытание в динамическом режиме, поскольку эксперимент в статических условиях не дает полной картины поведения сорбента в реальных условиях. В связи с этим фактом были проведены динамические испытания по сорбции исходным цеолитом ионов кадмия и свинца. Как видно из рис. 2, при извлечении кадмия коэффициент очистки снизился до 3 после прохождения 160 колоночных объемов.

С целью увеличения емкости исходный цеолит был переведен в натриевую и аммонийную формы по указанным выше стандартным методикам. По всем исследованным металлам емкость увеличилась. Таким образом, показано преимущество аммонийных и натриевых моноформ цеолита для извлечения ряда ионов тяжелых металлов, в частности очень токсичного и трудно осаждаемого кадмия.

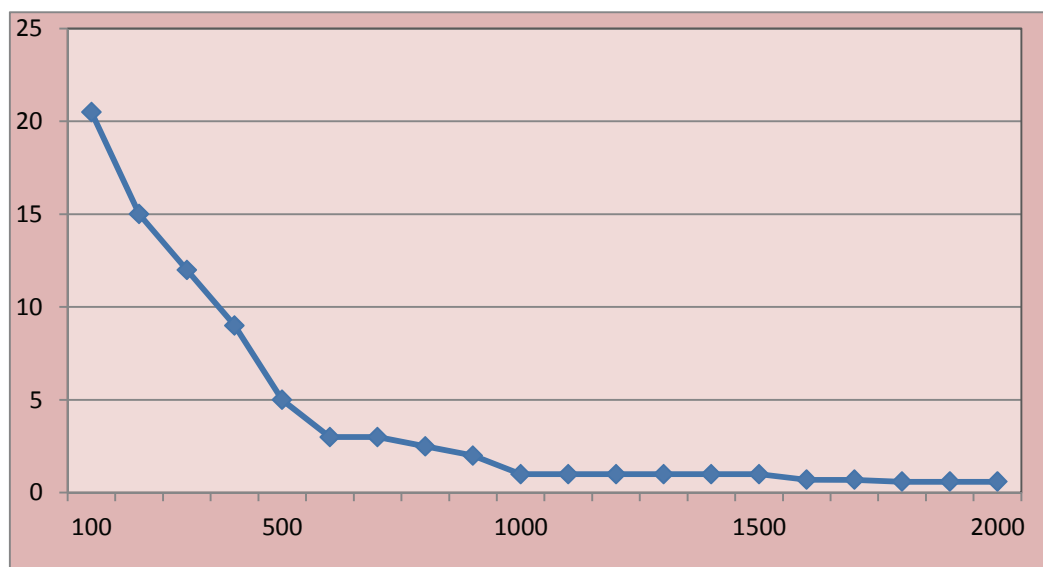


Рис. 2. Динамика сорбции кадмия модельного раствора

Лабораторные исследования не могут обеспечить полную информативность об эффективности очистки сорбционной очистки, поэтому проводилось дополнительное изучение результатов сорбционно-реагентной очистки на реальных водах, взятых из различных точек технологического процесса очистки гальванических стоков.

Фильтрация на скоростных напорных фильтрах позволяет значительно снизить в обрабатываемых стоках количество взвесей и коллоидных частиц, особенно при правильном подборе флокулянтов и режимов фильтрации [2].

Осветленные после отстойников промышленные стоки по трубопроводу поступают в накопитель. В накопителе вода набирается до определенного уровня, затем включается сигнализатор, включается автоматически насос и вода из накопителя по трубопроводу поступает в скоростной фильтр.



Скоростной напорный фильтр предназначен для доочистки сточных вод, содержащих механические примеси и коллоидные частицы.

Фильтр имеет герметичный корпус. Фильтрующим материалом служит загрузка цеолита фракцией 8...3 мм. В качестве поддерживающего слоя используется слой гравия. Фильтрующий слой и слой гравия поддерживаются ложным днищем.

После проведения лабораторных экспериментов по флокуляции и последующей фильтрации гальваностокков был произведен натурный эксперимент по очистке стоков методом флокуляции в потоке на напорном фильтре с автоматическим дозированием флокулянта в поток обрабатываемых стоков. Фильтрация производилась сверху вниз при загрузке синтетического цеолита NaX, формованного с глиной (цилиндры неправильной формы диаметром 3 мм и длиной от 3 до 8 мм). Перед фильтром в поток обрабатываемых стоков дозировали раствор флокулянта «Хитофлок – 4» с рабочей концентрацией 2 г/л. Скорости фильтрации задавались равными 360 л/ч и 720 л/ч, что соответствует линейной скорости 8 и 16 м/ч соответственно.

Натурные эксперименты показали, что фильтрация является предсказуемым и управляемым процессом, не зависящим от количества профильтрованных стоков в пределах собственного ресурса фильтра. Процессы фильтрации поддаются автоматизации, способны регулироваться с минимальными затратами труда.

Показано, что сорбционная очистка позволяет добиваться снижения остаточной концентрации исследованных тяжелых металлов на 15 % по сравнению с отстойниками.

Фильтрат через патрубок отводится в промливневую канализацию. Серьезным недостатком данных фильтров являлось то, что на их стенках, выполненных из коррозионных материалов, постоянно образовывалась гидроокись железа, которая как сорбент поглощала в себя остаточные концентрации тяжелых металлов, которые в дальнейшем вновь загрязняли уже осветленные стоки.

Стенки загрязненных фильтров претерпели тщательную пескоструйную очистку, обезжиривание специальными растворами, затем были загрунтованы и покрыты некоррозийными, стойкими к влиянию щелочей полиизобутиленовыми листами, которые были спаяны уже непосредственно в установках.

Для реконструкции напорных фильтров выполнены следующие работы:

- очистка металлическим песком внутренней и наружной поверхностей емкости в потолочном, вертикальном, нижнем положениях очистки;
- обеспыливание внутренней и наружной поверхностей емкости в потолочном, вертикальном, нижнем положениях очистки;
- обезжиривание уайт-спиритом внутренней и наружной поверхностей емкости;
- окраска фильтров снаружи на два раза эмалью ЭП-140;
- огрунтовка внутренней поверхности фильтров антикоррозионной грунтовкой ЭП-0215;
- оклейка внутренней поверхности фильтров полиизобутиленовыми пластинами толщиной 4 мм клеем 88-СА, со сваркой листов в один слой.

Обсуждение результатов

На основании проведенных лабораторных исследований показано, что схема доочистки сбросовых вод, включающая флокуляцию микрочастиц осадков, содержащих тяжелые металлы, с последующей фильтрацией через цеолитовую загрузку является перспективной.

На основании проведенных натурных экспериментов на реальных водах очистных сооружений КНААПО показана высокая эффективность флокуляционно-сорбционной схемы очистки сбросовых вод от тяжелых металлов. Коэффициенты очистки исходных вод после реактора составляют от 1300 до 50 для различных металлов. Наибольшие коэффициенты очистки соответствуют металлам, имеющим низкие значения ПДК (кадмий, хром).

Красильникова С. Д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДОРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОКОВ НА ОАО «КНААПО»

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов, С. С. Экологически безопасное гальваническое производство / С. С. Виноградов. – 2-е изд., перераб. – М.: «Глобус», 2002. – 352 с.
2. Красильникова, С. Д. Усовершенствование очистки гальванических стоков от алюминия на очистных сооружениях ОАО «КнаАПО» / С.Д. Красильникова // Дальневосточная весна-2008: материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. (Комсомольск-на-Амуре, 30 апр. 2008 г.). – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнаАГТУ», 2008. – С. 233-235.
3. Пат. № 2153395 Российская Федерация. Способ изготовления сорбента с металлосульфидным поглощающим слоем / Габутдинов М.С., Юсупов Р.А., Сопин В.Ф., Абзалов Р.Ф., Смердова С.Г., Черевин В.Ф., Петров Ф.К., Умарова Н.Н; заявл. 15.02.99; опубл. 27.07.2000. Бюл. № 21. – 18 с.
4. Пат. № 2150503 Российская Федерация. Штамм бактерий *DESULFOVIBRIO VULGARIS* "ЭГАСТ-5", используемый для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Смирнова Г.Ф., Баглай С.В., Смирнов Ю.Ю., Вайнштейн М.Б., Гоготова Г.И., Галушко А.С.; опубл. 10.06.2000.
5. Пат. № 2153475 Российская Федерация. Способ очистки сточных вод от хрома (III) / Елфимова Г.И., Машников И.В., Афанасьева В.А. – № 99108312/12; заявл. 22.04.1999; опубл. 27.07.2000.
6. Mier M.V. Heavy metal removal with Mexican clinoptilolite: Multi-component ionic exchange [Electronic resource] / M.V. Mier and oth.//Water research. - 2001. - vol. 35, no.2, p.373-378.
7. Takasaka A. Removal of cations from solution by using itaya zeolite [Electronic resource] /A.Takasaka, H. Inaba, Y. Matsuda // Nippon kagaku kaishi. - 1991. - vol.5, p. 618-622.
8. Гореликова, Е. И. Оценка ингаляционного канцерогенного риска здоровью населения г. Комсомольска-на-Амуре от свинцового загрязнения / Е. И. Гореликова, М. В. Гаврилова, И. П. Степанова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 93-102.



Степанова И. П., Гореликова Е. И., Степанов А. Н., Лещев Ю. Г.
I.P.Stepanova, E.I.Gorelikova, A.N.Stepanov, Y.G.Leshchev

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА СВИНЦА НА ПОДСТИЛАЮЩЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЗА «ЦИКЛ ЖИЗНИ» ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

FLUX DENSITY DISTRIBUTION OF LEAD-CONTAINING EMISSIONS AT THE UNDERLYING TERRAIN DURING THE "CYCLE OF LIFE" A POLLUTION SOURCE

Степанова Ирина Павловна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-914-179-29-10. E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

Ms. Irina P. Stepanova – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Health and Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: prof.stepanova@mail.ru

Степанов Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, декан электротехнического факультета 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, Department of Health and Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, city of Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru

Гореликова Евгения Игоревна – старший преподаватель Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorelikova_ei@mail.ru.

Ms. Evgeniya I. Gorelikova – Senior Lecturer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, city of Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorelikova_ei@mail.ru

Лещев Юрий Геральдович – старший преподаватель Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: luckkom@gmail.com.

Mr. Yuri G. Leshchev – Senior Lecturer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, city of Komsomolsk-on-Amur) e-mail: luckkom@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрен алгоритм оценки последствий выбросов поллютантов промышленными предприятиями за «цикл жизни» и после их закрытия на примере выбросов свинца предприятия по производству свинцовых аккумуляторных батарей ОАО «КнААЗ». Предложен способ зонирования территории по среднегодовой плотности потока вещества на подстилающую поверхность и выполнена его апробация.

Summary. This paper describes an algorithm for estimating the effects of pollutant emissions released by industrial enterprises during their cycle of life and after their closure; as exemplified by lead-containing emissions by JSC “КнААЗ” – a company producing lead-acid batteries. A method is proposed for area zoning by long-term annual average of the flux density of matter at the underlying terrain; the method has been successfully pilot-tested.

Ключевые слова: опасные зоны, плотность потока вещества, повышенная нагрузка на подстилающую поверхность, опасность, длительность влияния.

Key words: hazardous areas, substance flow density, increased load upon the underlying terrain, danger, duration of effect.

УДК 331.45

Предприятия, как правило, не укладываются своими выбросами в пределы границ выделенных для них санитарно-защитных зон. После закрытия предприятий возникает иллюзия безопасности, которая может стоить очень дорого.

В работе [1] рассмотрен общий алгоритм оценки последствий выбросов загрязняющих веществ промышленными предприятиями за «цикл жизни» и после их закрытия на примере выбросов свинца предприятия по производству свинцовых аккумуляторных батарей ОАО «КнААЗ» [2; 3]. Настоящая публикация является продолжением этой работы и посвящена расчету плотности потока свинца на подстилающую поверхность по среднесуточным данным $P_{цж}(r)$. Расчет этого параметра уже рассматривался в работе [6], где представлен один из упрощенных методов расчета $P_{цж}(r)$.

Если предположить, что плотность потока вещества $P_{цж}(r)$ изменяется вдоль радиуса r по тому же закону, что и функция концентрации вещества $C_{MAX ЦЖ}(r)$, то можно записать следующее выражение:

$$P_{цж}(r, \alpha) = P_{т\alpha} \cdot f_{10}(r),$$

где $P_{т\alpha}$ – максимальное значение плотности потока вещества:

$$P_{т\alpha} = P_{цж}(R1, \alpha).$$

Данную величину можно определить следующим образом:

$$P_{т\alpha} = \frac{4 \cdot M\alpha_{\Sigma}}{\pi \cdot \int_{R1}^{R_{з\alpha z}} f_{10}(r) \cdot r \cdot dr}.$$

Здесь $M\alpha_{\Sigma}$ – суммарный валовой выброс в секторе $\pi/4$, ограниченном радиусами $R1$ и $R_{з\alpha z}$ в соответствующем фиксированном азимутальном направлении α :

$$M\alpha(r) = \frac{\pi}{4} \int_{R1}^r r P_{цж}(r, \alpha) dr.$$

Исходные функции концентрации представлены с помощью относительной функции [1]:

$$f_{10}(r) = C_{MAX ЦЖ}(r) / C_{MAX ЦЖ}(R1),$$

где $R1$ – значение радиуса, при котором функция $C_{MAX ЦЖ}(r)$ принимает максимальное значение (в ближайшей к источнику выбросов исследованной точке).

Для удобства обработки и использования, функцию $f_{10}(r)$, которая задана в виде таблицы, так как определяется через $C_{MAX ЦЖ}(r)$, можно интерполировать. При этом, как правило, предпочтение отдается интерполяции с помощью кубических сплайнов, поскольку при этом коэффициенты интерполяционных полиномов рассчитываются так, чтобы в точках интерполяции непрерывными были первая и вторая производные.

Для осуществления кубической сплайновой интерполяции можно воспользоваться системой MathCAD, которая предлагает две встроенные функции: **cspline** и **interp**.

Сплайн-интерполяция проводится в два этапа.

На первом этапе с помощью функции **cspline** отыскивается вектор вторых производных функции $f_{10}(r)$. На втором этапе для любой точки r вычисляется значение интерполирующей функции $f_{10}(r)$.

На рис. 1 – 2 представлено распределение плотности потока вещества $P_{цж}(r)$ вдоль радиуса при разных азимутальных направлениях. Так, кривая 1 соответствует северному направлению, 2 – северо-восточному, 3 – восточному, 4 – юго-восточному, 5 – южному, 6 – юго-западному, 7 – западному, 8 – северо-западному.

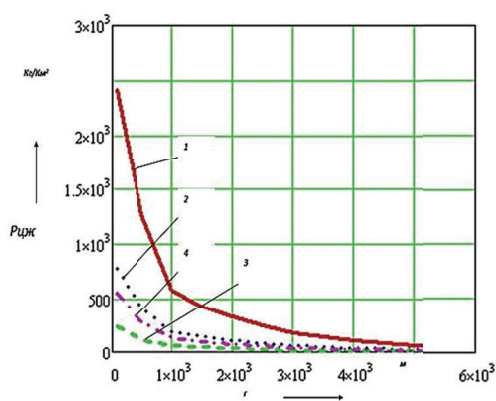


Рис. 1

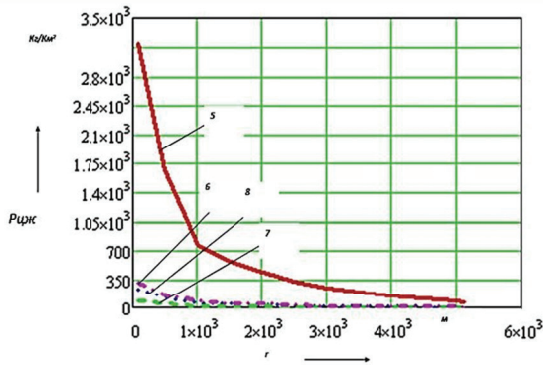


Рис. 2

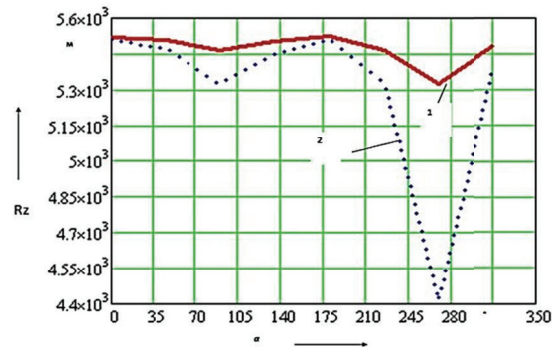


Рис. 3.

Границы опасных зон для плотности потока вещества определены из решения уравнений:

$$P_{цж}(r, \alpha) - 1 = 0 \text{ и } P_{цж}(r, \alpha) - 3 = 0.$$

Для решения данных уравнений можно воспользоваться встроенной функцией **Minerr** системы MathCAD. Результаты решения уравнений представлены на рис. 3, в виде графика 1 и 2 соответственно.

Критериальные значения плотности потока представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критериальные значения плотности потока вещества на подстилающую поверхность [7]

Уровень нагрузки	Значение показателя, кг/км ²
Минимальный	0,005 - 1
Умеренный	1 - 3
Повышенный	3 - 5

Для определения границ опасных областей можно вместо интерполирующей функции $f(r)$ использовать аппроксимирующее выражение, которое имеет следующий вид:

$$f_1(x) = a_1x^{-1} + a_2x^{-2} + a_3x^{-3},$$

где $a_1 = 217,781$; $a_2 = 2,249 \cdot 10^4$; $a_3 = -2,49 \cdot 10^6$.

Результаты оценки уровня свинцового загрязнения для ОАО «КнААЗ». Всего за 64 года выброшено $M_{\Sigma 64} = 450$ т, в среднем за 1 год – **7 031** кг. Среднемноголетняя плотность при равномерном распределении в зоне активного загрязнения (ЗАЗ) составила **81,415** кг/км². Максимальные выбросы пришлись на 1984 г. и составили 26,2 т/год, минимальные были зафиксированы в 2005 г. и составили 0,9 т/год. В период с 1970 по 1994 гг. валовые выбросы превышали среднемноголетний уровень [2; 3].

В табл. 2 представлены сводные данные по границам опасных зон, сформированных выбросами свинца ОАО «КнААЗ» за 64 года. На рис. 3 показано изменение размеров границ опасных зон в зависимости от азимута для средних концентраций свинца, сформированных за цикл жизни ОАО «КнААЗ».

На рис. 4 проведено картографирование опасных зон. В качестве картоосновы использовалась электронная карта г. Комсомольска-на-Амуре масштаба 1:10 000, разработанная ФГУ «ДВ АТП», 2008. Результаты расчета нанесены на карту с помощью программы «Corel draw». Обоснование возможности работы в такой программе как одной из возможных версий ГИС технологий приведено в работах Лещева Ю.Г. [4; 5].

Территория с повышенными уровнями нагрузки на подстилающую поверхность с плотностью выше 3 кг/км² (см. рис. 4) простирается с севера на юг на 15 км и с запада на восток на 6 км. Это вся территория города с пригородами.

Степанова И. П., Гореликова Е. И., Степанов А. Н., Лещев Ю. Г.

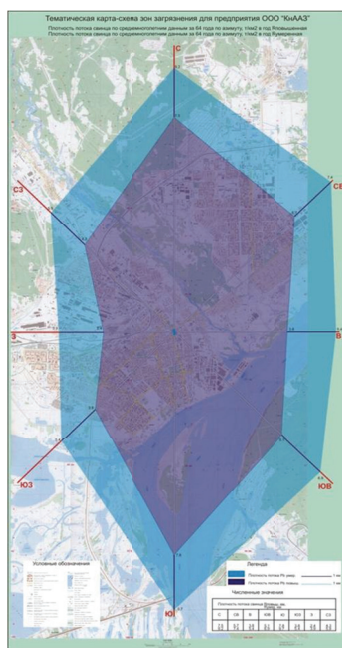
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА СВИНЦА НА ПОДСТИЛАЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЗА «ЦИКЛ ЖИЗНИ» ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

По данным работ Тисли И. (1992 г.) и Paasivirta J. (1991 г.), время полувыведения свинца в зависимости от типа почв может составить от 150 до 400 лет.

Таблица 2

Сводные данные по границам опасных областей $R_{Гр}$, км

Показатель опасности	Границы опасных областей по основным азимутальным направлениям							
	Ю	С	СВ	ЮВ	СЗ	В	ЮЗ	З
Область повышенной нагрузки с $P \geq 3-5$ кг/км ²	<7,8	<7,5	<5,7	<5,1	<4,3	<3,8	<3,8	<2,4
Область умеренной нагрузки с $P \geq 1-3$ кг/км ²	От 7,8 до 9,7	От 7,5 до 9,2	От 5,7 до 7,4	От 5,1 до 6,9	От 4,3 до 5,9	От 3,8 до 5,4	От 3,8 до 5,4	От 2,4 до 3,9
Область минимальной нагрузки с $P \geq 0,05-1$ кг/км ²	> 9,7	> 9,2	> 7,4	> 6,9	> 5,9	> 5,4	> 5,4	> 3,9
$C_{Ср. многол.}/ПДК_{МР} \geq 1$	$R_{МАХ} = 5,125$ м							



Среднегодулетние поля плотности атмосферного потока свинца на территорию, рассчитанные за весь период работы предприятия, являются важным прогностическим показателем для последующих мониторинговых оценок опасности действия свинца через воздух, почву и продукты питания

Обсуждение и интерпретация результатов. Рассмотренный в работе алгоритм позволяет учитывать только основные закономерности изменения параметров по радиусу и по азимуту на территории вокруг источника загрязнения. Он не учитывает процессы отражения вещества от преград, влияние шероховатостей поверхности территории и т.д.

Алгоритм предназначен для получения ранговых оценок существующих проблем и установления приоритетов мероприятий по регулированию уровня риска для здоровья населения от некачественной окружающей среды.

Полученные в работе результаты говорят о существовании потенциальной опасности для населения после закрытия завода в современной ситуации и в достаточно длительной перспективе.

Опасности обусловлены медленным (в течение 150-400 лет в зависимости от типа почв) выведением свинца из почв, на которые он выпал, и потенциальной угрозой попадания в организм через воздух в результате пыления территорий, прямо с почв или через продукты питания с загрязненных территорий.

При использовании территорий в зонах с повышенной плотностью потока свинца на подстилающую поверхность (см. рис. 4, см. табл. 2) следует предварительно проводить измерения концентраций свинца в почвах, и по результатам измерений принимать решения о характере использования территорий и комплексе реабилитационных мер.

Результаты работы имеют как научное значение для развития теории риска применительно к установлению взаимосвязей в системе «источник-окружающая среда – здоровье населения», так и прикладное значение: в работе определены размеры и границы территорий с минимальной, умеренной и повышенной нагрузкой свинца, сформировавшейся в течение 64 лет в результате деятельности ОАО КНААЗ в г. Комсомольска-на-Амуре.



ЛИТЕРАТУРА

1. Алгоритм оценки опасности выбросов предприятия за «цикл жизни» и после закрытия) / И. П. Степанова, Е. И. Гореликова, А. Н. Степанов, Ю. Г. Лещев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Сер. Науки о природе и технике. – 2012. – № IV-1(12). – С. 100-108.
2. Гореликова, Е. И. Разработка модели промышленного предприятия для ретроспективного анализа загрязнения окружающей среды на примере Комсомольского-на-Амуре аккумуляторного завода (ОАО КнаАЗ) / Е. И. Гореликова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Сер. Науки о природе и технике. – 2010. – № III-1(4). – С. 112-121.
3. Гореликова, Е. И. Оценка ингаляционного канцерогенного риска здоровью населения г. Комсомольска-на-Амуре от свинцового загрязнения / Е. И. Гореликова, М. В. Гаврилова, И. П. Степанова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Сер. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 93-102.
4. Лещев, Ю. Г. Применение графических методов для решения задач в экологических проектах / Ю. Г. Лещев // Сборник трудов 8-й международной научно-практической конференции в области экологии и безопасности жизнедеятельности «Дальневосточная весна-2008». – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – С. 426-428.
5. Лещев, Ю. Г. Совершенствование системы управления в области земельных отношений / Ю. Г. Лещев // Сборник трудов 9-й международной научно-практической конференции в области экологии и безопасности жизнедеятельности «Дальневосточная весна-2009». – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – С. 145-162.
6. Оценка последствий деятельности предприятий / И. П. Степанова, Е. И. Гореликова, А. Н. Степанов, Ю. Г. Лещев // Материалы V Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии», Челябинск, 3-5 октября 2012 г. – Челябинск, 2012. – С. 52-66.
7. Доклад о свинцовом загрязнении окружающей среды в Российской Федерации и его влиянии на здоровье населения / под ред. В. В. Снаткина. – М.: РЭФИА, 1997. – 233 с.

Чернышев Н. И., Зайков В. И., Аликина Н. С.

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОИЗВОДСТВЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ**

Чернышев Н. И., Зайков В. И., Аликина Н. С.

N. I. Chernyshev, V. I. Zaikov, N. S. Alikina

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ
НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ**

**THE STUDY OF POSSIBLE APPLICATIONS OF NANOTECHNOLOGY RESEARCH
TO AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE FAR EAST**

Чернышев Николай Ильич – кандидат сельскохозяйственных наук, профессор кафедры «Кадастр и геодезия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Nikolai I. Chernyshev – PhD in Agriculture, Professor, Department of Cadastre and Engineering Surveying, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Зайков Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастр и геодезия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: valerii_zaikov@mail.ru

Mr. Valery I. Zaikov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Cadastre and Engineering Surveying, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: valerii_zaikov@mail.ru

Аликина Наталья Сергеевна – аспирант Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства (Россия, Хабаровск). E-mail: natalya.alikina.78@mail.ru

Ms. Natalia S. Alikina – PhD Candidate, the Far Eastern Research Institute for Agriculture (Russia, Khabarovsk). E-mail: natalya.alikina.78@mail.ru

Аннотация. Представлен анализ перспективных направлений нанотехнологических исследований для производства сельскохозяйственной продукции на Дальнем Востоке. Отмечается, что в ближайшем будущем наиболее востребованными и эффективными для решения данной задачи будут научные разработки в области нанобиотехнологии и генной инженерии.

Summary. The paper presents a review of promising nanotechnology research for agricultural production in the Far East. It is noted that in the nearest future the most widespread and effective solution for such issues will be research and development in the field of nano-biotechnology and genetic engineering.

Ключевые слова: нанотехнология, нанобиотехнология, генная инженерия, селекция, сельскохозяйственная продукция.

Key words: nanotechnology, nanobiotechnology, genetic engineering, breeding, agricultural products.

УДК 63.001 12/18

Постановлением Правительства РФ от 2 августа 2007 г. № 498 утверждена Федеральная целевая программа «Развитие nanoиндустрии РФ на 2008-2010 годы». В концепции развития аграрной науки и научного обеспечения агропромышленного комплекса РФ на период до 2025 г., утверждённой приказом Минсельхоза России от 25 июня 2007 г. № 343, представлены основные направления по применению нанотехнологий в агропромышленном комплексе – это биотехнология, производство и переработка продукции сельского хозяйства, сельскохозяйственное машиностроение, технический сервис и другие направления. С использованием наноматериалов и нанотехнологий открылись новые возможности в биотехнологии и генной инженерии [1].

В России наряду с единым международным термином «нанотехнология» в научно-технической литературе используются аналогичные понятия и определения: лазерная, волновая, микроволновая, прецизионная терапия – в медицине; электротехнология – использование электромагнитного излучения в высоком и сверхвысоком частотном диапазоне; озон – в технологиях сельскохозяйственного производства [2].

В последние годы исследованиями по нанотехнологиям стали уделять активное внимание и в организациях, подведомственных Минсельхозу России, Россельхозакадемии и сельскохозяйственным вузам, что подтверждается многочисленными научными публикациями по данному направлению [3]. Схема организации НИР по применению нанотехнологий и наноматериалов в сельском хозяйстве России показана на рис. 1.

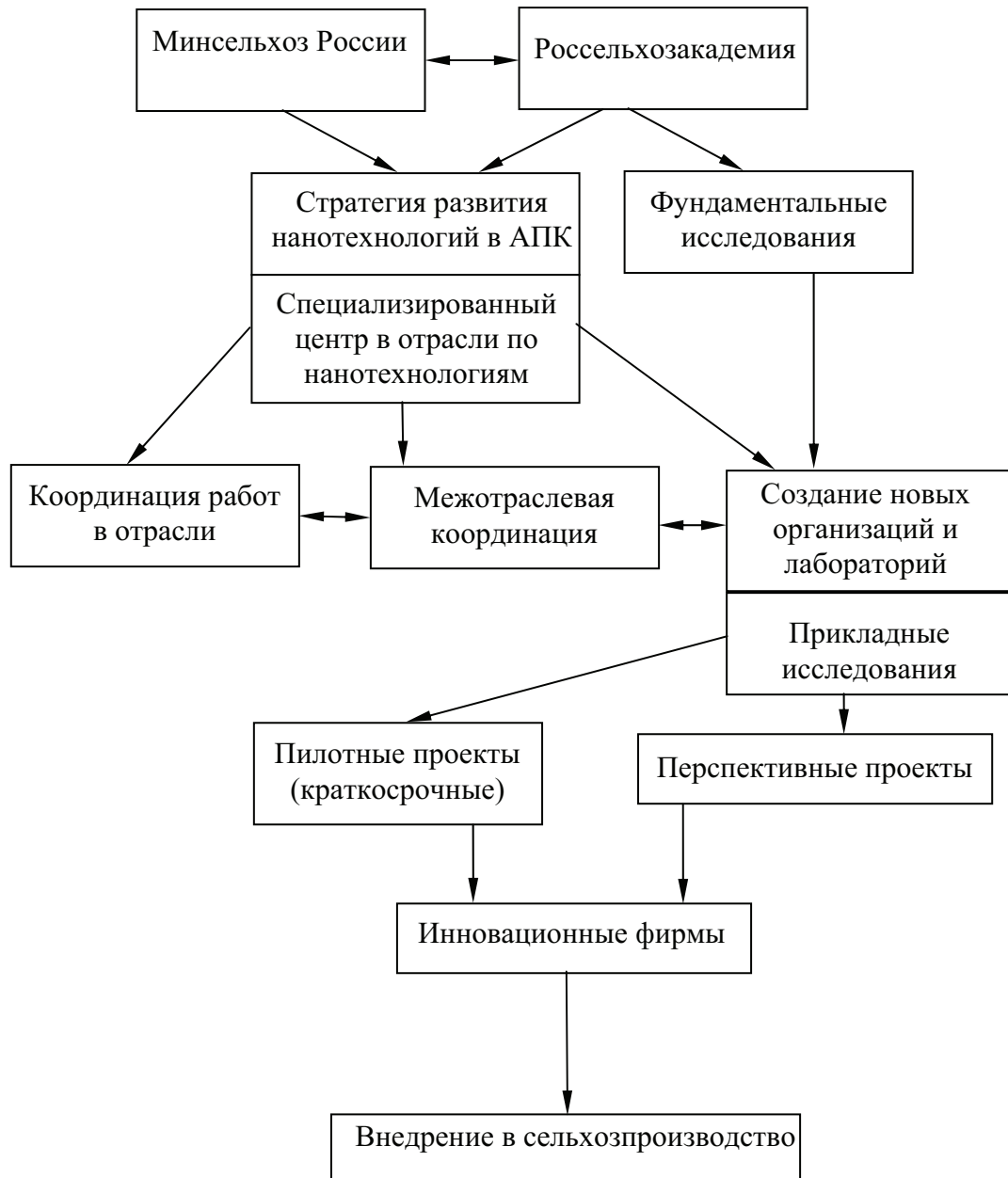


Рис. 1. Схема организации НИР по применению нанотехнологий и наноматериалов в сельском хозяйстве России

Общая классификация нанотехнологий, в том числе с использованием электромагнитных полей сверхвысоких частот, оптического и ультразвукового излучения, электрических зарядов и импульсов, аэрозолей и ионов, представлена на рис. 2.

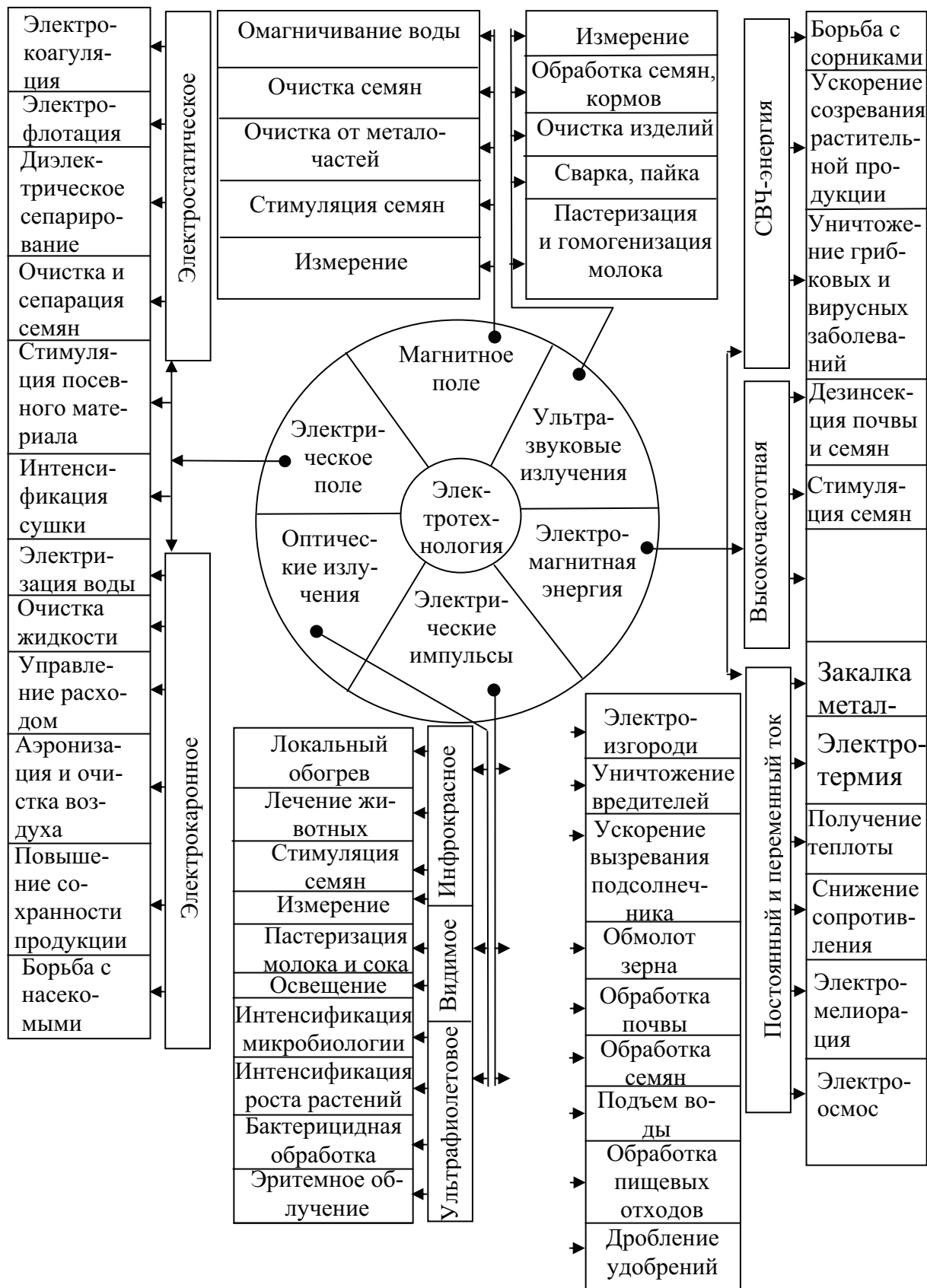


Рис. 2. Классификация применения электротехнологий в сельском хозяйстве



Основные направления исследований научных и образовательных организаций Минсельхоза России и Россельхозакадемии по данной тематике можно представить в следующем виде:

1. Нанoeлектротехнологии.
 - 1.1. Электрическое поле.
 - обработка семян при хранении и высеве;
 - диэлектрическое сепарирование семян.
 2. Магнитное и электромагнитное поле.
 - стимуляция растений;
 - сушка сельскохозяйственного сырья;
 - контроль качества.
 3. Оптическое излучение.
 - интенсификация процессов роста растений;
 - контроль и управление качеством продукции.
 4. Электроимпульсная обработка.
 - активирование процессов сушки и дезинсекции семян и сельхозпродукции.
 5. Нанобиотехнологии с использованием микроорганизмов.
 - оценка эффективности препаратов защиты растений;
 - обеспечение качества продукции;
 - получение новых продуктов питания.
 6. Нанотехнологии генетического маркирования биообъектов и геномной инженерии.
 - селекционная работа;
 - паспортизация сортов.
 7. Наночистота.
 - очистка и подготовка жидких сред;
 - концентрирование, пастеризация.
 8. Нанотехнологии точного земледелия.
 - влияние на наномасштабе на почвообразовательный процесс.
 9. Применение наноматериалов: нанопорошка, наноплёнки, нанопокрyтия.
 - предпосевная подготовка с целью повышения урожайности, питательной ценности среды, стимулирования растений;
 - снижение норм расхода пестицидов;
 - получение высокоэффективных удобрений, мелиорантов, наносред.

Постоянно, в связи с увеличением численности населения планеты, возрастает интерес к нанотехнологиям в сфере обеспечения населения безопасными продуктами питания при минимальном загрязнении окружающей среды [4]. Анализ отечественных разработок и зарубежных источников показывает, что наиболее востребованными для решения задач будут научные разработки в области биотехнологии и геномной инженерии. В этом аспекте их роль, особенно для развитых и развивающихся стран, в том числе и России, будет доминирующей. Улучшение генетических свойств возделываемых культур является перспективным подходом, с помощью которого производство сельскохозяйственной продукции способно удовлетворить предъявленные к нему требования [5].

Нанотехнологии, как и классическая селекция, могут оперативно влиять на производство и качество урожая, продуктивность растений, на поддержание и воспроизводство сортов, используя генетическую изменчивость и разнообразие, закодированное в нанометровом масштабе в ДНК. Основные направления развития и сферы применения продуктов нанобиотехнологии представлены в табл. 1 и на рис. 3. Традиционная селекция оперирует и комбинирует многими генами – одновременно переносит нужные и бесполезные, с помощью молекулярно-нанобиотехнологических методов единственный ген может быть перенесён в желаемую нить ДНК.

Основные направления развития и сферы применения продуктов биотехнологии

Отрасль	Характер применения
Генная инженерия	Секвенирование и модификация ДНК
Медицина	Доставка лекарственных препаратов внутрь клетки, использование ферментов и микроорганизмов при производстве сложных лекарств, синтез новых антибиотиков, диагностика, микро- и нанохирurgia, разработка биосовместных поверхностей контактов и материалов для протезирования и имплантации
Сельское хозяйство	Получение новых штаммов микроорганизмов, новые методы селекции растений и животных (включая клонирование)
Пищевая промышленность	Создание новых методов переработки и хранения пищевых продуктов, синтез белка одноклеточными организмами
Химическая промышленность	Новые эффективные катализаторы, мембранные технологии
Контроль за состоянием окружающей среды	Совершенствование методов тестирования и мониторинга, средств детектирования и борьбы с химическим и биологическим оружием, технологий переработки и утилизации отходов
Энергетика	Новые виды топлива, способы его получения, хранения и использования
Нанoeлектроника	Сенсорика, биочипы, информационные технологии



Рис. 3. Схема применения нанобиотехнологии



Одним из основных направлений нанобиотехнологии растений в настоящее время является получение культурных растений, толерантных к воздействию вредных веществ. Решение данной проблемы ведется в двух направлениях: прямая селекция и создание трансгенных растений путём введения генов гербицидтолерантности любого происхождения. Существует три подхода к созданию гербицидтолерантных культур, позволяющих уменьшить поглощение гербицида растением:

- обеспечить синтез чувствительного к гербициду белка в таком количестве, чтобы его хватило на выполнение присущих ему функций в присутствии гербицида;
- уменьшить способность белка, чувствительного к гербициду, к связыванию;
- обеспечить инактивацию гербицида в растении в ходе метаболизма.

С целью создания растений, устойчивых к вредным насекомым, также были использованы методы генной инженерии.

Широкие возможности открывают нанотехнологии в переработке сельскохозяйственной продукции. Уже разработаны технологии получения пищевых добавок и лекарств (микроинкапсулирование). Это могут быть лекарства, витамины, пищевые красители, получаемое из растений сырьё или другие специализированные продукты, для которых необходимо сохранить вкус и стабильность при хранении (фрукты и овощи).

Исходя из результатов испытаний всех уровней, введение стресс-факторов и фиторегуляторов в оборот на фоне точного выполнения агротехнологий выращиваемых культур можно повысить продуктивность посевов зерновых и зернобобовых культур минимум на 12-18 %, корнеплодных и клубнёвых – на 15-20 %, льна – 20-25 %, овощных – на 25-40 % [6,7,8]. Воздействие кремнеорганических препаратов повышает урожайность сельскохозяйственных культур на 25-55 %. Ускоряет их созревание на 10-15 дней, улучшает качество и питательную ценность продукции.

Использование вышеуказанных методов и приёмов на Дальнем Востоке на практике может привести к снижению использования химических средств защиты растений, повышению урожайности, сохранению качества и увеличению сроков хранения, повысить уровень решения селекционных программ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральная целевая программа «Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008-2010 годы»: утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 2 августа 2007 г. № 498.
2. Головин, О. И. Введение в нанотехнологию / О. И. Головин. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 112 с.
3. Федоренко, В.Ф. Возможности и перспективы реализации нанотехнологий в агропромышленном комплексе / В. Ф. Федоренко // Материалы выставки «День Российского поля – 2007», Ростовская область 1-4 июля 2007 г. – С. 32-35.
4. Бородин, И. Ф. Состояние нанотехнологических разработок в мире и в сельском хозяйстве России / И. Ф. Бородин // Нанозлектротехнологии в сельском хозяйстве: Материалы научно-технического семинара. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – С. 3-18.
5. Чесноков, Ю. В. Нанобиотехнологии и современная селекция растений // Применение нанотехнологий и наноматериалов в АПК: сб. докладов / Ю. В. Чесноков. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – С. 19-29.
6. Воронков, М. Г. Силатраны в медицине и сельском хозяйстве / М. Г. Воронков, В. П. Барышок. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 208 с.
7. Использование соединений кремния в сельском хозяйстве / В. М. Дьяков, В. В. Матыченков, Е. А. Чернышев, Я. М. Амосова. – М.: НИИТЭХИМ, 1990. – 32с.
8. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках / Т. В. Баранова, В. И. Зайков, Н. И. Чернышев, Н. С. Аликина // Учёные записки КНАГТУ. Науки о природе и технике. – 2012. – № 4-1(12). – С. 109-112.

ПАМЯТИ НАШИХ КОЛЛЕГ
IN MEMORY OF OUR COLLEAGUES

Шунейко А. А.
A. A. Shuneyko

ВЯЧЕСЛАВ МАТВЕЕВИЧ КУЗЬМИН

MR. VYACHESLAV M. KUZMIN

Шунейко Александр Альфредович – доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры лингвистики и межкультурной коммуникации Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8-4217-52-98-18. E-mail: shuneyko@knastu.ru

Mr. Alexander A. Shuneyko – Doctor of Philology, Associate Professor, Professor at the Department of Linguistics and Cross-cultural Communication, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin avenue; 8-4217-52-98-18. E-mail: shuneyko@knastu.ru

Ушел из жизни доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электро-механики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, действительный член Академии электротехнических наук Российской Федерации, президент Дальневосточного отделения АЭН Российской Федерации Вячеслав Матвеевич Кузьмин.

Вячеслав Матвеевич родился 3 сентября 1952 года в городе Свободном Амурской области. Вся его административная, преподавательская и творческая деятельность были связаны с родным университетом и электромеханикой. Им он отдавал практически все свои силы, талант администратора, исследователя и внимательного руководителя. Вспомним основные этапы его творческого и административного роста.

В 1975 году он окончил Комсомольский-на-Амуре политехнический институт. В этом же году был принят ассистентом на кафедру электрических машин КнАГПИ. С 1975 по 1976 годы в должности старшего радиомастера проходил службу в рядах Советской армии. После службы вернулся на кафедру электрических машин, где проработал в должности ассистента до 1978 года. В этом году стал аспирантом кафедры электрических машин и аппаратов Томского политехнического института. В 1981 году завершил обучение в целевой аспирантуре при Томском политехническом институте и был принят ассистентом на ту же кафедру, где обучался в аспирантуре. В 1982 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Автомный источник с электромашинным формированием кривой выходного напряжения». В этом же году в качестве старшего преподавателя кафедры электрических машин вернулся в КнАПИ. В 1986 году стал заведующим кафедрой электрических машин КнАПИ. В 1990 году стал доцентом кафедры электрических машин КнАПИ. В 1994 году стал профессором кафедры электрических машин КнАГТУ. С 1996 по 2000 год являлся профессором и заведующим кафедрой электромеханики КнАГТУ. С 2000 по 2002 годы для работы над докторской диссертацией был ведущим научным сотрудником кафедры электромеханики КнАГТУ. В 2002 году защитил докторскую диссертацию на тему «Трансформаторы для устройства электронагрева». С этого же года был профессором и заведующим кафедрой электромеханики КнАГТУ.

Кроме основных этапов карьерного и научного роста было много иных видов деятельности, связанных с различными сторонами жизни университета и направленных на оптимизацию образовательного и исследовательского процессов. Вячеслав Матвеевич, кроме того что руководил научным коллективом кафедры электромеханики, занимался разработкой и освоением серийного производства электронагревательных устройств трансформаторного типа, созданием двух новых лабораторий, открытием четырех новых специальностей и направлений подготовки выпускников университета. Он подготовил восемь кандидатов технических наук. Был членом Совета университета.



Со времени основания, в январе 2010 года, журнала «Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» Вячеслав Матвеевич был неизменным заведующим отделом энергетики серии «Науки о природе и технике».

Исследовательская деятельность Вячеслава Матвеевича была сконцентрирована на проблемах электромеханики, электронагрева, трансформаторов для устройств электронагрева, децентрализованных энергосистем, автономных источников электропитания и бытовых машин и приборов. Им опубликовано 127 научных работ, среди которых две монографии и пять учебных пособий. Имеет 41 свидетельство на изобретения и патенты.

Вячеслав Матвеевич был награжден дипломом лауреата Конкурса губернатора Хабаровского края, нагрудным знаком «Изобретатель СССР» и нагрудным знаком «Почетный работник высшей школы».

Память о Вячеславе Матвеевиче, неизменно внимательном к коллегам и ученикам, останется в сердцах тех, кто работал вместе с ним и под его руководством.



13 января 2013 г. на 74-м году жизни после болезни скончался доктор технических наук, профессор кафедры «Технология сварочного производства»

ДОЛотов БОРИС ИВАНОВИЧ

Долотов Б. И. родился в 1939 г. в Москве. После окончания МИСиС в 1963 г. был направлен во ВНИИ неорганических материалов в лабораторию сварки, где занимался разработкой и внедрением электронно-лучевых процессов сварки в производство, изучением коррозионных явлений на сварных швах алюминиевых сплавов и сталей.

В 1979 г. переехал на постоянное место жительства в г. Комсомольск-на-Амуре, где совмещал работу в отделе сварки КнаАПО и на кафедре «Технология сварочного производства» КнаАГТУ. На заводе занимался разработкой и внедрением новых и совершенствованием существующих

способов сварки и технологий. Неоднократно признавался лучшим изобретателем завода по итогам года, а его изобретения находили признание на международных салонах и выставках в Женеве, Сеуле, Париже и др. В КнаАГТУ разрабатывал оригинальные учебные курсы по ТРИЗ и теории развития творческой личности. В 2007-2009 гг. занимал должность заведующего кафедрой «Технология сварочного производства». Он автор более 200 научных трудов, 16 учебных пособий, 6 монографий. Его преподавательский стаж – 29 лет.

В 1999 г. Борис Иванович защитил кандидатскую диссертацию, а в 2011 г. – докторскую.

Профессор Долотов Борис Иванович пользовался большим уважением среди коллег по работе, аспирантов и студентов. Был энергичной, творческой личностью, занимал активную жизненную позицию.

Коллектив преподавателей и сотрудников университета, студенты скорбят в связи с кончиной Долотова Б. И. и выражают глубокие соболезнования его родным и близким.

*Коллектив кафедры «Технология сварочного производства»,
сотрудники и администрация университета*