

Гусева Р. И., Ша Мингун
Rosa. I. Guseva, Shu Mingoon

**ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОБШИВОК
ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА В САМОЛЕТОСТРОЕНИИ. ИЗМЕНЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ФОРМОВАНИЯ**

**PRODUCING THIN-WALLED LINING PLATES OF CARBON FIBER IN AIRCRAFT
ENGINEERING: A CHANGE OF PROCESS PARAMETERS DURING MOLDING
OF ITEMS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS**



Гусева Роза Ивановна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология самолетостроения», зам. декана самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: r_guseva@knastu.ru.

Ms. Rosa I. Guseva – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Aircraft Engineering, Deputy Dean of the Aircraft Engineering Faculty, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: r_guseva@knastu.ru



Ша Мингун – магистр технических наук, самолетостроительный факультет Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: smg19871029@163.com.

Mr. Shu Mingoon – Master of Engineering, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: smg19871029@163.com

Аннотация. Рассмотрены стадии изготовления углепластиковых обшивок-пластин в автоклаве и технологические параметры режимов формования изделий из ПКМ, особенности их изменения в процессе формования. На основе результатов эксперимента выведена зависимость возможных прогибов пластины от действия каждого технологического параметра-фактора.

Summary. In this paper we explore the consecutive steps of the process of producing carbon fiber lining plates in a pressure chamber, and the technological parameters of the process of molding items of polymeric composite materials as well as their change during the process of molding. Proceeding from the results of our experimental studies, we deduce the relation between possible plate deflections and the impact of each of the process parameter/factor.

Ключевые слова: углепластиковая обшивка-пластина, давление, температура, скорость нагрева, технология, выдержка изделия, формование.

Key words: carbon fiber plate, pressure, temperature, heating rate, technology, product soaking, molding.

УДК 629.7: 668.395.002

Самолето- и вертолетостроение является специфической отраслью машиностроения, в которой интенсивно внедряются новые полимерные композиционные материалы (ПКМ), по своим весовым и уникальным характеристикам позволяющие снизить вес планера самолета (вертолета) и увеличить его ресурс.

Использование ПКМ в конструкции планера самолета определяет технологический потенциал авиационной техники, выделяет приоритеты по использованию передовых техно-

логий, прогрессивных проектных и технологических решений при производстве авиационной техники.

Первые опыты в постановке и решении технологических задач для слоистых и волокнистых композитов выявили необходимость учета целого комплекса физико-химических явлений, сопровождающих изготовление конструкций.

За отличными весовыми показателями ПКМ стоит сложная задача проектирования и трудоемкая технология изготовления изделий из ПКМ, принципиально отличающаяся от производства металлических изделий.

После формования в изделиях из ПКМ возможны различные виды макродефектов. Коробление, поводка изделий из полимерных композиционных материалов является одним из наиболее распространенных и существенных видов брака. Коробление затрудняет сборку деталей, ухудшает точность и герметичность изделий, приводит к возникновению дополнительных монтажных напряжений, которые вместе с действующими остаточными напряжениями вызывают растрескивание изделий и уменьшают их эксплуатационную надежность.

Довольно часто встречающимися видами дефектов в изделиях из ПКМ являются: расслоение; трещины в связующем; складки; подмятие слоев; царапины; риски, забоины; отрыв поверхностных слоев; коробление, поводки и прогибы готового изделия; неправильная укладка наполнителя; оголение основы, нахлесты препрега, срезы препрега, зоны с повышенным содержанием пор и пузырьков.

В работе дается оценка влияния изменения технологических параметров на стадии формования для получения качественного изделия и стабильных прочностных характеристик. Кроме того, в работе проводится оценка управления технологическим процессом по каждому этапу формования.

В статье наиболее значимыми факторами, учитываемыми в процессе формования изделий из ПКМ, взяты следующие параметры:

- 1) Температура изделия, установившаяся через 1 ч после начала формования T_2^0 (параметр X_0);
- 2) Температура изделия, достигнутая за 4 ч формования T_4^0 (параметр X_1);
- 3) Температура изделия, установившаяся через 7 ч после начала формования T_6^0 (параметр X_2);
- 4) Температура изделия, достигнутая за 9 ч формования T_9^0 (параметр X_3);
- 5) Температура изделия, установившаяся через 12 ч после начала формования T_{12}^0 (параметр X_4);
- 6) Время выдержки на втором этапе формования t_2 (параметр X_5);
- 7) Скорость охлаждения $ctg(\alpha)$ (параметр X_6).

Формование тонкостенных обшивок проходит в автоклаве по ступенчатому циклу. В экспериментальных запрессовках обшивок-пластин использованы пластины размером 150×260 мм, изготовленные из трех слоев углеткани ЭЛУР-П-0,08 на связующем горячего отверждения ЭНФБ при статистических значениях температуры отверждения $T_{отв} = 180$ °С и давлении 0,6 МПа.

На рис. 1 приведены графики основных параметров формования пластин во времени.

Эксперименты проведены на двух группах обшивок, которые имеют различные значения параметров формования на втором этапе:

- при изготовлении первой группы обшивок выдержка шла при температуре 125 °С в течение 6 - 7 ч;
- при изготовлении второй группы обшивок выдержка проходила при температуре 125 °С в течение 4 - 5 ч.

Планирование эксперимента проводили согласно методике рационального планирования экспериментов М.М. Протодьяконова и Р.И. Тедера.

Из графика следует, что формование обшивок идет по ступенчатому циклу. Видно, что имеется отставание температуры нагрева обшивки и оснастки во времени. Этап выдержки обшивки при температуре отверждения составляет не 6 - 7 ч, а 4 - 5 ч, что говорит о неоптимальности технологического процесса формования.

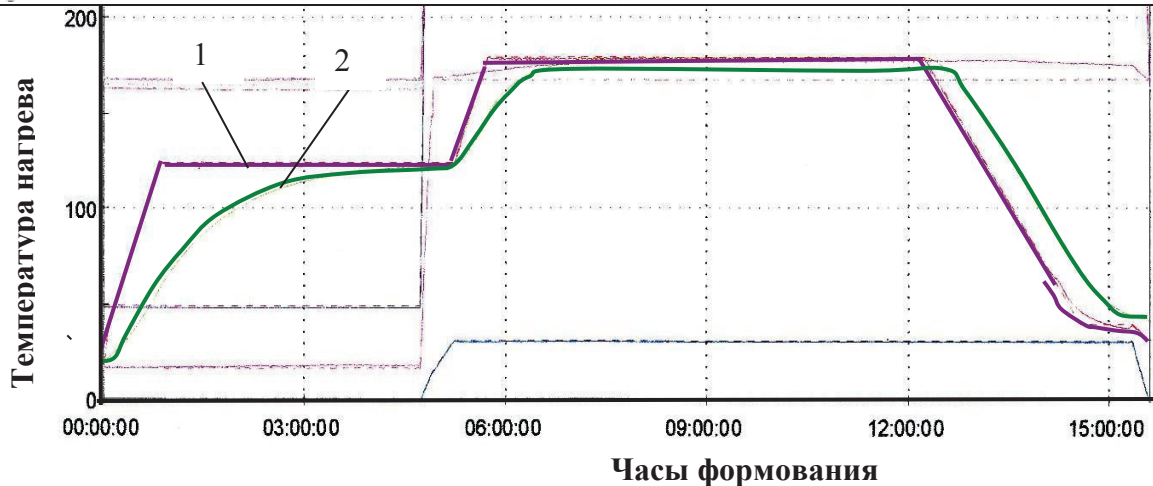


Рис. 1. Графики изменения технологических параметров формования обшивок-пластин во времени: 1 – линия температур нагрева оснастки; 2 – линия температур в обшивке

Из технологического припуска запрессовок обшивок были вырезаны образцы-пластины размером 150×260 мм, изготовленные из трех слоев углеткани ЭЛУР-П-0,08 на связующем горячего отверждения ЭНФБ. Формование проходило при температуре отверждения $T_{отв} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление на этапе выдержки изделия – 0,6 МПа.

Армирование слоев обшивки выполнено в соответствии с приведенными в табл. 1 рекомендациями.

Таблица 1

Схема армирования слоев материалов

Номер слоя	Угол армирования основы	Марка материала	Примечание
1	0°	Э2-62	Стеклоткань, декоративное покрытие
2	0°	ЭЛУР	Угольная лента
3	90°	ЭЛУР	Угольная лента
4	0°	ЭЛУР	Угольная лента
5	0°	ОРПС	Бумага из нитевидных кристаллов карбида кремния

Для определения влияния времени выдержки на первой площадке температур (время выдержки полуфабриката обшивки при температуре 125 °С) на конечное качество обшивки из ПКМ при формовании проведено две группы опытов на пяти обшивках в каждой группе.

В табл. 2 и 3 приведены режимы формования обшивок первой и второй групп.

Таблица 2

Требуемые режимы формования первой группы обшивок

Номер обшивки	Время выхода τ на 125 °С, мин	Время выхода на температуру режима отверждения, ч	Время окончания выдержки обшивки, ч	Время окончания технологического процесса
1	53	8,5	14,9	19,5
2	51	9,6	16,1	19,9
3	50	8,1	14,4	18,7
4	49	8,2	14,7	18,9
5	52	9,3	15,1	18,4

Гусева Р. И., Ша Мингун

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОБШИВОК ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА В САМОЛЁТО-СТРОЕНИИ. ИЗМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ

Технологические параметры процесса формования таких запрессовок фиксировались стандартными ленточными самописцами на диаграммах, полученных при формовании в автоклаве.

Таблица 3

Требуемые режимы формования второй группы обшивок

Номер обшивки	Время выхода τ на 125 °С, мин	Время выхода на температуру режима отверждения, ч	Время окончания выдержки, ч	Время окончания технологического процесса
1	51	5,8	11,3	14,9
2	50	5,0	11,5	14,9
3	50	5,4	11,8	14,6
4	51	5,2	11,5	14,7
5	50	5,4	11,2	14,5

В ходе исследований было установлено, что величина подаваемого давления является постоянной величиной. Величина давления, обеспечивающая максимальное качество изделия при минимальных энергозатратах, была определена практически и установлена на уровне 0,55 - 0,7 МПа (отклонение его от заданной величины незначительно). Время приложения давления тоже является неварьируемой величиной, поэтому в работе давление формования и время его приложения рассматриваются как факторы постоянные и лимитированные.

При нагревании изделия в автоклаве невозможно добиться протекания процесса нагрева полуфабриката изделия по установленному режиму, поэтому невозможно указать единую величину температуры изделия на каждом из этапов формования, т.к. достижение требуемой температуры изделия происходит через 1 - 3 ч после прекращения повышения температуры. Поэтому в работе в качестве факторов X_0, X_1, X_2, X_3, X_4 рассматриваются температура изделия через 1, 4, 7, 9 и 12 ч. Для получения устойчивых средних значений результатов опытов каждый опыт следует повторить не менее трех – пяти раз.

Чтобы выявить влияние каждого исследуемого технологического фактора X_i на величину Y (в работе это величины коробления-прогиба обшивок панелей) нужно задать фактору X_i не менее четырех-пяти значений. Число столбцов в плане эксперимента должно равняться числу исследуемых факторов. Например, если X_0 – это температура изделия, установившаяся через 1 ч после начала подачи тепла, и предполагается, что эта температура в ходе эксперимента будет варьироваться по пяти уровням, то этим пяти уровням будут соответствовать назначенные экспериментом некоторые реальные уровни температур.

Соотношение условных (табл. 5) и реальных (табл. 6) уровней исследуемых факторов для примера приведены ниже в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Соотношения условных уровней исследуемых факторов

Факторы X_i	Значения факторов				
	1	2	3	4	5
Реальный уровень фактора $X_0, ^\circ\text{C}$	120	122	125	128	131
Реальный уровень фактора $X_1, ^\circ\text{C}$	121	123	125	127	129
Реальный уровень фактора $X_2, ^\circ\text{C}$	123	124	125	126	127
Реальный уровень фактора $X_3, ^\circ\text{C}$	178	179	180	181	182
Реальный уровень фактора $X_4, ^\circ\text{C}$	170	175	180	185	190
Реальный уровень фактора $X_5, \text{ч}$	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Реальный уровень фактора $X_6, ^\circ\text{C}/\text{мин}$	1,490	1,495	1,500	1,505	1,510

Таблица 5

Реальные технологические факторы при формировании первой группы обшивок

Номер опыта	X ₀ , °C	X ₁ , °C	X ₂ , °C	X ₃ , °C	X ₄ , °C	X ₅ , ч	X ₆ , °C/мин
1	90,3	112,9	119,4	166,8	180	2,8	1,53
2	87,5	109,6	117,3	172,4	176,5	3,3	1,546
3	96,8	114,2	120	173,5	180	2,9	1,531
4	97,6	115,4	120	170,6	178,0	3,6	1,502
5	89,9	112,3	124,3	172,8	173,6	3,2	1,537
Среднее	92,42	112,88	120,2	171,22	177,62	3,16	1,529

Отвержденные обшивки после охлаждения до нормальной температуры деформировались по схеме, приведенной на рис. 2. Величины короблений в трех точках замера для первой и второй групп обшивок приведены в табл. 6 и 7.

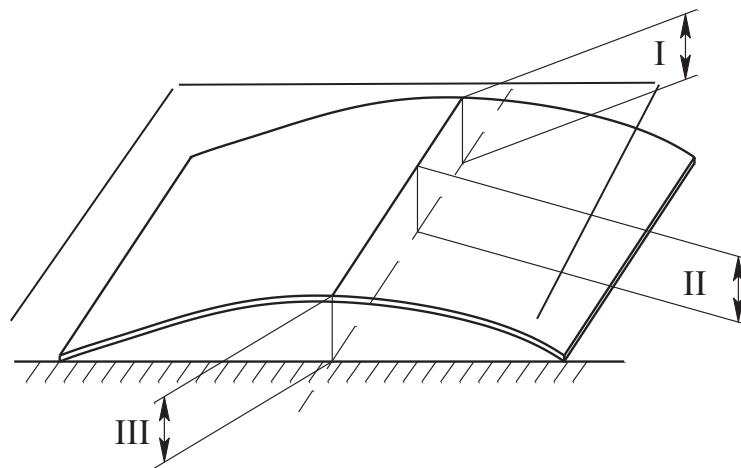


Рис. 2. Деформация обшивки и схема расположения точек замеров по поверхности обшивки

Таблица 6

Величины коробления первой группы обшивок

Номера контрольных точек					
1		2		3	
Величина коробления, Y ₁ , мм	Толщина обшивки, δ ₁ , мм	Величина коробления, Y ₂ , мм	Толщина обшивки, δ ₂ , мм	Величина коробления, Y ₃ , мм	Толщина обшивки, δ ₃ , мм
3,6	0,16	5,7	0,16	2,7	0,16
4,8	0,16	2,3	0,16	3,9	0,16
5,2	0,16	3,8	0,16	4,2	0,16
3,4	0,16	4,4	0,16	5,4	0,16
5,7	0,16	4,2	0,16	5,1	0,16

Величины коробления второй группы обшивок

Номера контрольных точек					
1		2		3	
Величина коробления, Y_1 , мм	Толщина обшивки, δ_1 , мм	Величина коробления, Y_2 , мм	Толщина обшивки, δ_2 , мм	Величина коробления, Y_3 , мм	Толщина обшивки, δ_3 , мм
3,6	0,16	5,3	0,16	4,1	0,16
4,3	0,16	4,7	0,16	4,7	0,16
4,8	0,16	4,2	0,16	4,8	0,16
3,8	0,16	4,2	0,16	4,2	0,16
5,2	0,16	4,3	0,16	4,5	0,16

Для вывода связывающего регрессионного уравнения **функции коробления обшивки Y от параметров режима формования** (от факторов X_i) необходимо определить, как зависит функция прогибов от каждого фактора. Для этого построены графики зависимости функции Y от каждого фактора X_i .

Примеры графиков зависимости функции Y от каждого фактора X_i приведены на рис. 3 □ 5.

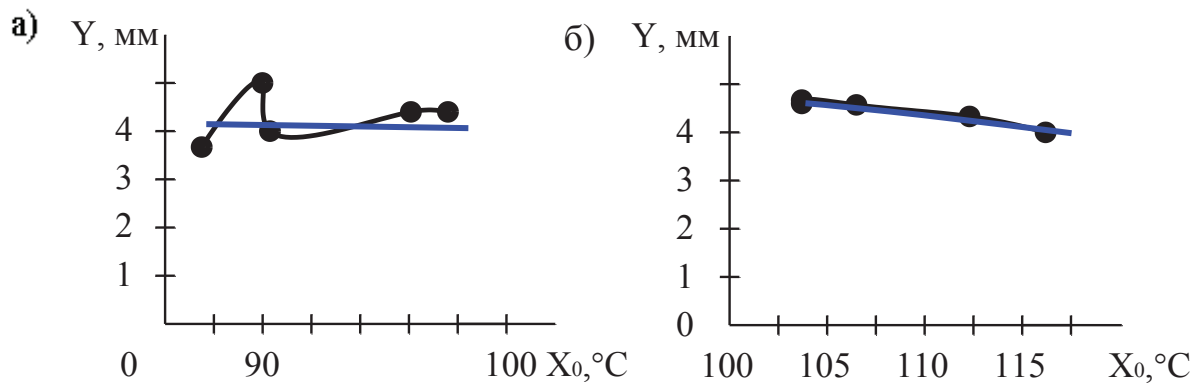


Рис. 3. Графики зависимости функции прогибов Y от фактора X_0 :
а – первая группа обшивок; б – вторая группа обшивок

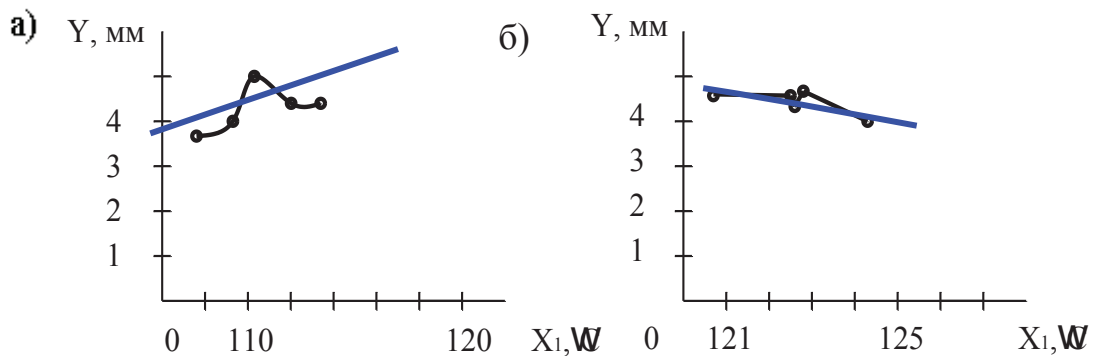


Рис. 4. Графики зависимости функции прогибов Y от фактора X_1 :
а – первая группа обшивок; б – вторая группа обшивок

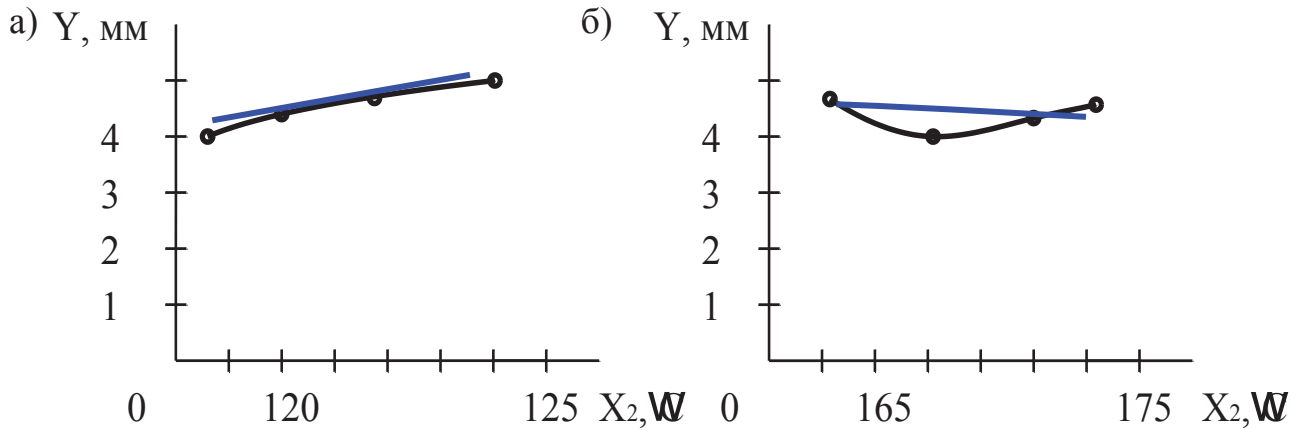


Рис. 5. Графики зависимости функции прогибов Y от фактора X_2 :
а – первая группа обшивок; б – вторая группа обшивок

Из рис. 3 - 5 видно, что характер зависимостей функции Y от различных факторов для двух групп формуемых обшивок из ПКМ отличаются друг от друга. Это объясняется тем, что время выдержки изделия на первом этапе формования у одной группы обшивок равно 3 ч, а у второй – 6 ч. Первая группа обшивок формируется для восприятия небольших силовых нагрузок, в то время как вторая группа обшивок формируется для больших силовых нагрузок. Кроме того, различие характеров графиков обусловлено также и большими погрешностями значений факторов от установленных величин.

Так как характеры зависимостей функции прогибов Y от факторов X_i для разных групп обшивок различны, то в работе выведены два регрессионных уравнения. В зависимости от продолжительности первого этапа формования можно применить одно из двух полученных уравнений.

С высокой степенью точности все графики для первой группы обшивок могут быть аппроксимированы в виде прямых (графики зависимости функции Y от факторов X_0 , X_1 , X_2 , X_3 и X_5) и парабол (графики зависимости функции Y от факторов X_4 и X_6). В связи с этим для вывода регрессионного уравнения используем метод наименьших квадратов, на основе которого составляем систему нормальных уравнений.

Так как зависимость функции Y от факторов X_4 и X_6 имеет нелинейный характер, то расчет коэффициентов уравнения частных зависимостей функции Y от факторов X_4 и X_6 проводится методом наименьших квадратов.

Для первой группы обшивок общее уравнение зависимости функции Y от параметров X_i имеет вид:

$$Y = (0,036 X_0 + 0,106 X_1 + 0,189 X_2 + 0,064 X_3 + 0,16 X_5)(-0,0016 X_4 - 0,102 X_6 + 0,527).$$

Для второй группы обшивок также было получено общее уравнение зависимости функции Y от параметров X_i . Влияние фактора X_4 исключали, т.к. значения фактора одинаковы для всех экспериментов

$$Y = -0,048 X_0 - 0,061 X_1 - 0,011 X_2 - 0,005 X_3 + 0,083 X_5 + 3,612 X_6 + 13,992.$$

Для проверки правильности полученного уравнения сравним теоретические и экспериментальные величины функции прогибов. Результаты анализа приведены в табл. 8 и 9.

Таблица 8

Сводный массив исходных данных для расчета при формировании первой группы обшивок

Номер опыта	X ₀ , °C	X ₁ , °C	X ₂ , °C	X ₃ , °C	X ₄ , °C	X ₅ , ч	X ₆	Y _{теор} , мм	Y _{пр} , мм	ΔY, мм
1	90,3	112,9	119,4	166,8	180	2,8	1,53	4,043	4	0,043
2	87,5	109,6	117,3	172,4	176,5	3,3	1,546	4,2	3,67	0,53
3	96,8	114,2	120	173,5	180	2,9	1,531	4,114	4,4	-0,286
4	97,6	115,4	120	170,6	178,0	3,6	1,502	4,428	4,4	0,028
5	89,9	112,3	124,3	172,8	173,6	3,2	1,537	4,626	5	-0,374

Погрешность расчетов составляет в среднем 5,7 %.

Таблица 9

Сводный массив исходных данных при формировании второй группы обшивок

Номер опыта	X ₀ , °C	X ₁ , °C	X ₂ , °C	X ₃ , °C	X ₄ , °C	X ₅ , ч	X ₆	Y _{теор} , мм	Y _{пр} , мм	ΔY, мм
1	112,3	122,6	171,0	180	180	4,2	1,537	4,242	4,33	-0,088
2	106,5	125,0	173,9	180	180	4,9	1,551	4,451	4,57	-0,119
3	103,7	120,7	155,6	163,0	180	2,2	1,549	4,903	4,6	0,303
4	116,2	124,3	167,2	169,8	180	2,7	1,523	3,869	4	-0,131
5	103,7	122,8	163,3	168,3	180	4,3	1,512	4,704	4,67	0,034

Погрешность расчетов составляет около 0,074 %.

Анализируя полученные результаты и представляя влияние факторов на качество изделия, можно отметить:

- фактором, оказывающим наибольшее влияние на качество изделия для второй группы обшивок, является скорость охлаждения готового изделия;
- двумя другими значимыми факторами являются время отверждения (время второго этапа формирования) изделия и температура изделия, установившаяся через 4 ч после начала формирования (рис. 6).

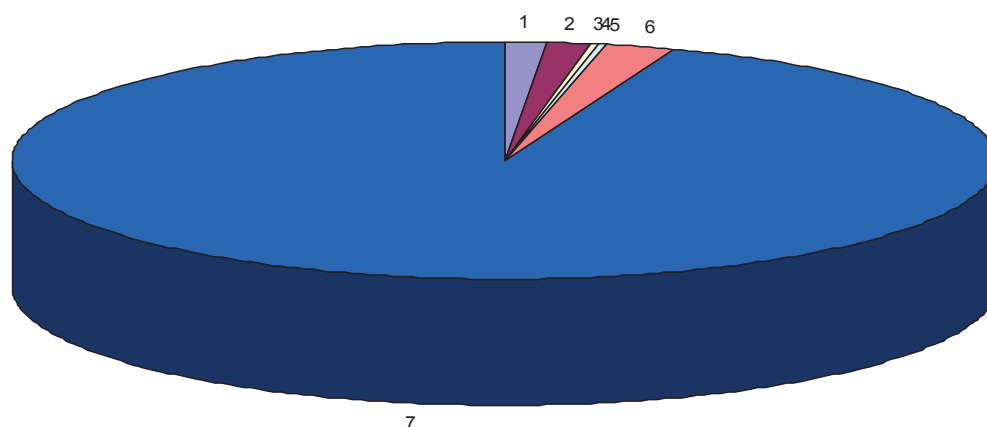


Рис. 6. Иллюстрация степени влияния факторов X_i на качество изделия для второй группы формирования обшивок:

1 - температура изделия, установившаяся через 1 ч после начала формирования T₂⁰ (параметр X₀); 2 - температура изделия, достигнутая за 4 ч формирования T₄⁰ (параметр X₁); 3 - температура изделия, установившаяся через 7 ч после начала формирования T₆⁰ (параметр X₂); 4 - температура изделия, достигнутая за 9 ч формирования T₉⁰ (параметр X₃); 5 - температура изделия, установившаяся через 12 ч после начала формирования T₁₂⁰ (параметр X₄); 6 - время выдержки на втором этапе формирования t₂ (параметр X₅); 7 - скорость охлаждения (параметр X₆)



Выводы:

1. При формировании обшивок из ПКМ невозможно добиться точного соответствия требуемых и реальных параметров режима формирования.

2. В зависимости от продолжительности первого этапа формирования влияние факторов на качество изделия из ПКМ является различным: чем больше время первого этапа формирования, тем меньшее влияние оказывает температура, установившаяся на изделии через 12 ч после начала процесса формирования. Это объясняется тем, что после первого этапа формирования при большей его длительности отклонение температуры изделия от заданной температуры уменьшается и ко второму этапу формирования отличие становится минимальным.

3. Чем больше время первого этапа формирования, тем меньшее влияние оказывает температура, установившаяся на изделии через 12 ч после начала процесса формирования. Это объясняется тем, что при большем времени первого этапа режима формирования отличие температуры изделия от требуемой температуры на определенный момент времени становится минимальным.

4. Фактором, оказывающим наибольшее влияние на качество изделия для первой группы обшивок, является температура изделия через 4 ч после начала формирования;

5. Фактором, оказывающим наибольшее влияние на качество изделия для второй группы обшивок, является скорость охлаждения готового изделия.

6. Факторами, оказывающими наибольшее влияние на качество изделия для первой группы обшивок, являются температура изделия через 4, 6 и 12 ч после начала формирования и скорость охлаждения. Наиболее значимым фактором является температура изделия через 6 ч после начала формирования, характеризующая недостаточный нагрев изделия после окончания первого этапа формирования:

- чем меньше значение температурных факторов, тем большие прогибы характерны для готового изделия;

- чем больше скорость охлаждения изделия, тем меньшее качество у готового изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1 Гусева, Р. И. Анализ состояния поверхности высокопрочных композиционных материалов с углеродным волокном и исследование их механических характеристики / Р. И. Гусева, Сюй Цюй, Юй Гао // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 6.

2 Протодьяконов, М. М. Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер. – М.: Наука, 1970.

3 Гусева, Р. И. Оценка свойств аппретов для улучшения связи между полимерной матрицей и высокопрочным углеродным волокном Т800 / Р. И. Гусева, Сюй Цюй, Юй Гао // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 4.

Мироненко В. В., Чеславская А. А., Белых С. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЯЖКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЗОНАХ ЗАЖАТИЯ ГУБКАМИ

Мироненко В. В., Чеславская А. А., Белых С. В.

Vladimir V. Mironenko, Agnia A. Cheslavskaya, Sergey V. Belykh

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЯЖКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЗОНАХ ЗАЖАТИЯ ГУБКАМИ

SIMULATION OF STRETCH-FORMING OF AIRBORNE VEHICLE' SKIN WITH REGARD TO THE EFFECTS ARISING IN THE ZONES OF THE WORKPIECE BLANK CLAMPING BY JAWS

Мироненко Владимир Витальевич – программист учебно-научного центра Autodesk кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники» Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; +79501110235. E-mail: mironenko_vv@istu.edu.

Mr. Vladimir V. Mironenko – programmer, Educational and Research Center “Autodesk” under the Department of Aircraft Engineering and Operation, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, 83, Lermontova Str.; +7 (950) 1110235. E-mail: mironenko_vv@istu.edu

Чеславская Агния Альбертовна – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Проектирование и виртуальное моделирование изделий и технологических процессов в авиастроении» кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники» Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; +79086463061. E-mail: chaa@yandex.ru.

Mrs. Agnia A. Cheslavskaya – Junior Research Fellow, Research Laboratory "Design and Virtual Modeling of Products and Processes in Aviation Industry", Department of Aircraft Engineering and Operation, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, 83 Lermontova Str.; +7 (908) 6463061. E-mail: chaa@yandex.ru.

Белых Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +79141795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru.

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

Аннотация. Предложен метод расчета поведения заготовки при обтяжке, учитывающий поведение заготовки в районе губок. Проведено математическое моделирование одной детали по разработанному методу. Представлены результаты сравнения метода, используемого на сегодняшний день, и предложенного. Рассмотрен альтернативный способ устранения пружинения после обтяжки.

Summary. In this paper we suggest a method for calculating the behavior of a work piece blank during stretch forming with regard to its behaviour in the jaws. We carry out mathematical modeling of a blank according to our method and then compare the currently adopted method with the one proposed. We also suggest an alternative way of eliminating springback effects after the stretch forming process.

Ключевые слова: обтяжка, моделирование, пружинение.

Key words: stretch forming, simulation, springback.

УДК 621.7.043

При формообразовании деталей таким способом как обтяжка, остро возникает вопрос о том, каким способом смоделировать этот процесс, чтобы учесть все необходимые параметры. В данный момент применяется метод сечений, который заключается в том, что поверхность оснастки разбивается на сечения. В каждом сечении двумя точками указывается область размещения детали. Далее, в каждом сечении детали рассчитываются параметры формообразования. Расчет останавливается тогда, когда в каждом сечении заготовка закрыла область детали. Этот метод подробно описан в [2]. Однако у этого метода есть ряд таких недостатков как:

- не учитывается поведение заготовки за пределами контура детали и в районе губок (самые опасные зоны);
- упрощенный расчет деформаций и распределения толщин;
- упрощенный расчет контакта заготовки с оснасткой;
- не учитывается пружинение, возникающее после формообразования (считается, что калибровка полностью устраняет пружинение).

Предлагается гибридный метод моделирования процесса обтяжки в два этапа, который учитывает положительные стороны имеющегося метода и устраняет его недостатки на втором этапе моделирования. Второй этап строится на методе конечных элементов и позволяет более точно моделировать процесс обтяжки. Реализации предлагаемого метода рассмотрена на примере моделирования процесса обтяжки детали типа «Обшивка» из материала 2024 толщиной 1,5 мм (см. Рис. 1). Для формообразования используется пресс с программным управлением FET600T для поперечной обтяжки.

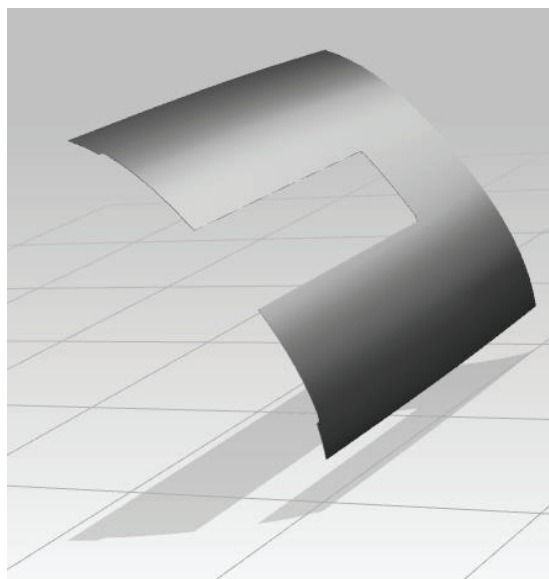


Рис. 1. Анализируемая деталь

На первом этапе проведено предварительное моделирование по методу сечений. Данный метод реализован в программе S3F фирмы ACB. Для этой программы необходимо создать рабочую поверхность оснастки. Далее необходимо ее ориентировать относительно системы координат прессы, чтобы в системе координат S3F была возможность моделирования процесса формообразования. Поверхность разбивается на сечения с указанием в каждом сечении с помощью двух точек области расположения детали. В S3F задаются характеристики материала, геометрические припуски к размерам детали для определения размеров заготовки и коэффициент трения Амонтона-Кулона.

В результате моделирования по описанному методу расчета получены следующие данные:

- рекомендуемое положение пуансона на столе прессы (по оси Z 800 мм);
- предварительные размеры заготовки (1752 мм – 827 мм.);
- количество переходов (1 переход);
- сформирована управляющая программа для работы прессы (траектория движения губок);
- предварительно рассчитаны максимальные деформации в заготовке (см. Рис. 2).

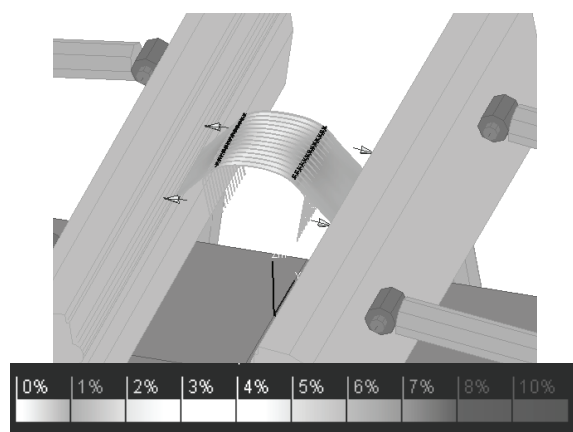


Рис. 2. Распределение деформаций по результатам первого этапа моделирования

Пружинение считается нулевым исходя из того, что после этапа обтяжки, называемого «Калибровка», оно не должно возникать. Все полученные данные являются исходными для второго этапа моделирования, который позволит более полно и точно оценить параметры процесса формообразования.

В основе второго этапа моделирования лежит метод конечных элементов и решение контактных задач. По полученным ранее данным выставляется оснастка на определенную высоту и создается геометрическая модель верхней и нижней частей губок. Построена геометрическая модель заготовки с размерами 1700 мм – 8300 мм (см. Рис. 3).

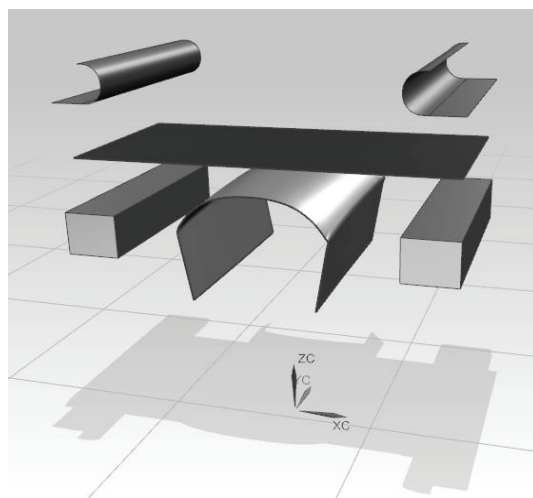


Рис. 3. Геометрическая модель для второго этапа моделирования

Для конечно-элементного анализа используется программный комплекс PAM-STAMP французской фирмы ESI Group. Далее, на основе созданной геометрической модели строится конечно-элементная сетка (для нижних губок объемная).

Для моделирования приняты следующие допущения:

- пуансон является набором поверхностных элементов и абсолютно жестким телом;
- зажатие губок моделируется сжатием абсолютно жестких тел сверху и гиперупругих подкладок снизу;
- в качестве модели материала для гиперупругих подкладок снизу используется модель Mooney–Rivlin;
- заготовка моделируется плоскими конечными элементами с заданной толщиной;
- абсолютно жесткие тела повторяют форму верхних губок;
- формообразование ведется за счет движения элементов, моделирующих губки;
- поворот губок на требуемый угол проводится до начала формообразования, а не в процессе.

Модель материала заготовки 2024 задана следующими параметрами:

- модуль Юнга – 64 ГПа;
- коэффициент Пуассона – 0.38;
- плотность – 2.6 кг/мм³;
- коэффициенты анизотропии r_0, r_{45}, r_{90} – 0.6215, 0.8096, 0.5437;
- пластическая часть кривой течения задана через функцию «Krupkowsky law», имеющую вид $\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n$. Константы данной функции для материала 2024 равны $K = 0.32725$ ГПа, $n = 0.2325$, $\varepsilon_{ps0} = 0.001433$.

Управляющая программа, созданная в S3F, должна быть пересчитана в траекторию движения губок, представленную в перемещениях [1]. Это значит, что первая точка в траектории движения губок (представленной в координатах) принимается за базовую и её координаты обнуляются. Затем координаты остальных точек рассматриваются как приращения к базовой точке в положительном или отрицательном направлении. Последним шагом пересчёта управляющей программы является назначение временных интервалов для каждого из приращений. После данных преобразований управляющую программу можно использовать как граничные условия в PAM-STAMP для моделирования движения губок. Для моделирования движения губок использовался метод задания перемещений с определенными интервалами времени по осям X и Z.

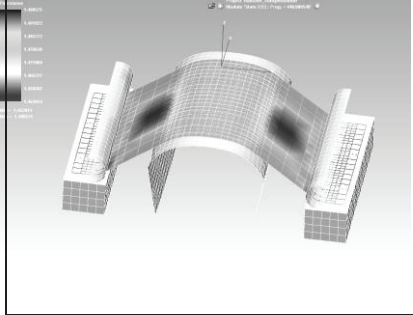
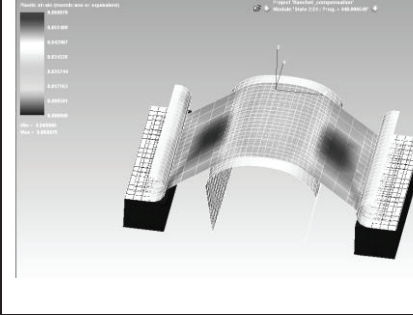
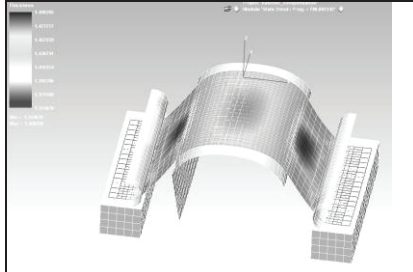
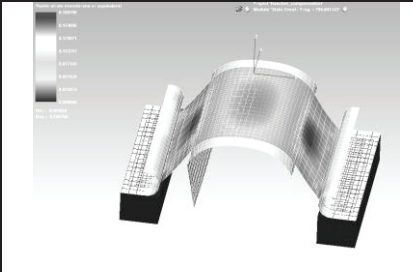
В результате моделирования получены распределения толщин и пластических деформаций по поверхности заготовки. Результаты моделирования по этапам процесса обтяжки показаны в таблице.

Таблица

Результаты моделирования

Распределение толщин на заготовке	Минимальная толщина, мм	Распределение пластических деформаций на заготовке	Максимальная деформация, %
	1.498		0.0432

Продолжение таблицы

Распределение толщин на заготовке	Минимальная толщина, мм	Распределение пластических деформаций на заготовке	Максимальная деформация, %
	1.45		6
	1.35		18

В результате расчета по второму этапу моделирования есть возможность отследить наиболее важные параметры, такие как распределение толщин и пластических деформаций по всей поверхности заготовки в любой момент времени (см. таблицу). По результатам моделирования видно, что характер распределения максимальных деформаций отличается от того, что было получено в результате расчета в S3F на первом этапе (см. Рис. 4). Величина максимальных деформаций в S3F составляет 6 %, а в PAM-STAMP получено значение в 3 раза больше – 18 %. Зона максимальных деформаций и минимальной толщины при расчете в PAM-STAMP размещается в местах схода заготовки с поверхности пуансона и в месте около зажатия губок, что не учитывается в S3F.

ПК PAM-STAMP позволяет рассчитать пружинение после формообразования с учетом калибровки. Область, в которой рассчитывалось пружинение, ограничена поверхностью контакта заготовки с оснасткой. Рисунок 4 показывает, что после калибровки максимальное пружинение составляет 9 мм, т.е. остается достаточно большим.

Для устранения погрешности на детали, вызванной пружинением после формообразования, был проведен итерационный процесс компенсации пружинения в оснастке. Суть итерационного процесса компенсации пружинения в оснастке заключается в том, что рабочая поверхность оснастки, созданная на первом этапе для моделирования в ПК S3F, корректируется методом последовательного приближения на величину пружинения, полученного в результате расчета в ПК PAM-STAMP. В системе PAM-STAMP величиной пружинения является расстояние, измеренное по нормали конечного элемента между заготовкой на конечном этапе формовки до заготовки на этапе, когда произошло пружинение. Итерации продолжаются до тех пор, пока не будут достигнуты заданные требования компенсации. На рисунке показаны результаты компенсации оснастки на величину расстояния по нормали от не компенсированной поверхности оснастки до скомпенсированной.

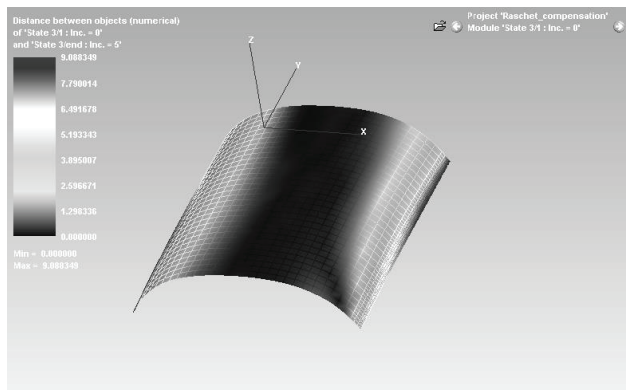


Рис. 4. Пружинение после формообразования детали обтяжкой с учетом калибровки

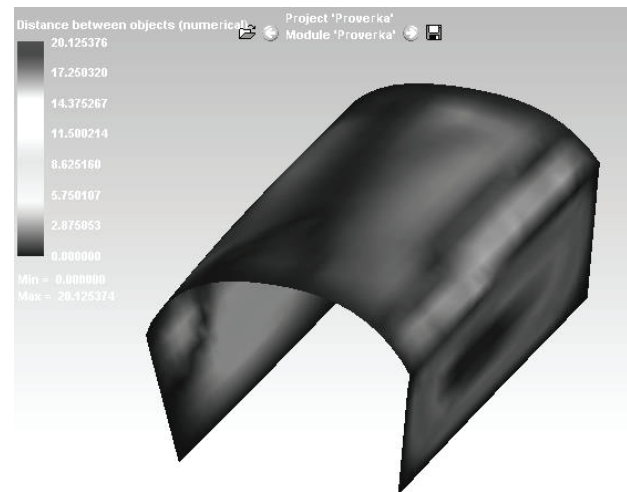


Рис. 5. Результаты компенсации оснастки (максимальное расстояние 20 мм)

Таким образом, предлагается метод моделирования поведения заготовки при обтяжке, выполняемый в два этапа:

- 1) предварительное моделирование в S3F;
- 2) точный расчет формообразования заготовки обтяжкой в PAM-STAMP.

Предлагаемый метод позволяет более точно учитывать деформации и напряжения, возникающие в заготовке в результате обтяжки. Также моделирование в PAM-STAMP более реально представляет процесс обтяжки в связи с моделированием зажатия губок. Предлагаемый метод дает возможность оценить величину пружинения после формообразования, а также уменьшить погрешность деталей путем компенсации оснастки на величину пружинения. В результате при использовании данного метода моделирования возможно прогнозирование появления брака при формообразовании и снижение объема доводочных работ, связанных с устранением последствий пружинения после формообразования.

Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

ЛИТЕРАТУРА

1. Формообразование профильных заготовок с помощью листового обтяжного пресса / А. А. Кривенюк, А. В. Станкевич, С. И. Феоктистов, Р. Ф. Крупский, С. В. Белых // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1(14) – С. 4-8.
2. PAM-stamp 2012 User's Guide, ESI Group, 2012. – 960 с.
3. Малащенко, А. Ю. Конечно-элементное моделирование процесса изготовления гибридных листовых деталей / А. Ю. Малащенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 4. – С. 40-43.

Мельниченко О. В., Власьевский С. В.
Oleg V. Melnichenko, Stanislav V. Vlasevskiy

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВОЗА
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ**

**INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AC LOCOMOTIVES
IN THE REGENERATION BRAKING MODE**

Мельниченко Олег Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, дом 15; +7-902-1702437. E-mail: melnichenko@irgups.ru
Mr. Oleg V. Melnichenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, head of the Department of Electrically Propelled Vehicles, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo Str.; +7 (902) 1702437. E-mail: melnichenko@irgups.ru.

Власьевский Станислав Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47; +7-914-5475447. E-mail: vlas@festu.khv.ru

Mr. Stanislav V. Vlasevskiy - Doctor of Engineering, Professor, Department of Electrotechnical Engineering, Electromechanical Engineering, Electric Technologies, the Far Eastern State University of Transport (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk, 47, Serysheva Str.; +7 (914) 5475447. E-mail: vlas@festu.khv.ru.

Аннотация. В статье раскрыты причины низкой энергетической эффективности работы современных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения. Показан путь ее повышения с помощью применения способа расширения регулировочной области напряжения инвертора на четвертой зоне регулирования по слежению за величиной тока якоря генератора путем уменьшения регулируемого угла опережения инвертора.

Summary. In this paper we try to reveal the causes of the unsatisfactory energy efficiency of modern AC locomotives in the regeneration braking mode. Our idea is to apply the method of expanding the control range of inverter voltage at the fourth control zone for controlling the amperage of the armature current of a power generator by reducing the adjustable phase advance angle of the inverter.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, рекуперативное торможение, инвертор, генератор, тяговый трансформатор.

Key words: AC locomotive, regeneration braking, inverter, power generator, traction transformer.

УДК 629.423.1

В настоящее время существует проблема недостаточности энергоэффективности работы современных электровозов переменного тока с тиристорными четырехзонными выпрямительно-инверторными преобразователями. Особенно это относится к режиму рекуперативного торможения электровоза, интерес к которому проявляется потому, что он является энергосберегающим режимом, существенно снижающим эксплуатационные затраты на тягу поездов.

Научные поиски способов повышения энергетической эффективности системы рекуперативного торможения электровозов ведутся специалистами ряда научно-исследовательских и образовательных организаций нашей страны. Особую актуальность им придают большие масштабы использования электрической тяги на сети железных дорог России.

Анализ процессов работы четырехзонных инверторов, ведомых сетью, позволил выявить основные причины низкой энергетической эффективности режима рекуперативного торможения электровоза, коэффициент мощности которого в эксплуатации не превышает 0,65.

Снижение энергетической эффективности рекуперативного торможения связано, прежде всего, с достаточно большой величиной угла запаса инвертора ($\delta = 25 - 30$ эл. град), который поддерживается автоматически по закону $\delta = \text{const}$ с помощью системы автоматического регулирования угла опережения β в зависимости от угла коммутации γ , состоящего из суммы двух углов: γ_1 – угол коммутации большого контура и γ_2 – угла коммутации малого контура. Установка большой величины угла запаса δ необходима потому, чтобы избежать нарушения инверторного режима в реальных условиях эксплуатации. Причина этого – влияние колебательного переходного процесса, который возникает во время коммутации и распространяется за ее пределы, вызывая повторное отпирание плеч преобразователя, тогда как они должны быть надежно заперты в пределах угла δ [1; 3].

Помимо большого угла запаса инвертора δ энергетическая эффективность современных электровозов снижается еще и потому, что для обеспечения электрической устойчивости инвертора и улучшения распределения тока нагрузки между параллельно включенными двигателями, работающими при рекуперативном торможении в режиме генератора, в цепь их якоря вводят добавочный резистор R_d . Однако при этом возникает достаточно большие потери энергии в добавочных резисторах, которые при высокой скорости движения и достаточно больших токах якоря генератора (700 – 800 А) на высших зонах регулирования достигают величины 12 – 15 % от всей энергии, возвращаемой в сеть. Кроме того, на электровозе при номинальном напряжении сети существует ограничение по напряжению на коллекторе генератора при регулировании напряжения инвертора на четвертой (высшей) зоне. Здесь при достижении середины четвертой зоны (т.е. три с половиной зоны) и соответствующей ей скорости движения на генераторе устанавливается номинальное значение напряжения, выше которого на нем уже нежелательно допускать. Это обстоятельство сужает область регулирования напряжения инвертора и сохраняет достаточно большую величину потерь активной энергии на добавочных резисторах.

Уменьшить эти потери можно путем постоянного поддержания уменьшенных величин тока якоря генератора $I_{я}$ при регулировании соответствующих тормозных сил с целью сохранения допустимых высоких скоростей движения поезда на спуске. Для этого вместо уменьшения тока возбуждения (уменьшения магнитного потока генератора, а следовательно, и уменьшения его напряжения $U_{Г}$), которое выполняется на 4-й зоне регулирования в настоящее время на электровозах, необходимо увеличивать выпрямленное напряжение инвертора $U_d = U_{d(4)}$ на этой зоне путем увеличения регулируемого угла управления тиристором инвертора α_p (или иначе – уменьшения регулируемого угла опережения инвертора β_p , так как $\beta_p = \pi - \alpha_p$) в пределах зоны. В результате такое регулирование приведет к уменьшению тока $I_{я}$ при неизменном напряжении генератора $U_{Г}$. Это следует из рассмотрения выражения

$$I_{я} = \frac{U_{Г} - U_d}{\sum R}, \quad (1)$$

где $\sum R$ – алгебраическая сумма сопротивлений всех элементов цепи тока якоря генератора.

Кроме того, при таком способе увеличивается возврат тока рекуперации из электровоза в контактную сеть, что будет видно при дальнейшем рассмотрении этого способа.

Таким образом, с целью повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения путем увеличения возврата тока рекуперации из электровоза в контактную сеть и снижения потерь энергии в добавочных резисторах предлагается применить способ расширения регулировочной области инвертора на 4-й

зоне регулирования по слежению за величиной тока якоря генератора. В этом способе поддержание на 4-й зоне диапазона высоких скоростей на уклоне пути можно обеспечить не путем регулирования в сторону уменьшения тока в обмотке возбуждения I_B , а регулированием в сторону уменьшения тока якоря генератора I_A , сохраняя неизменным ток возбуждения I_B при соответствующей скорости движения электровоза. Такой способ регулирования в случае уменьшения величины уклона пути (а следовательно, и уменьшения тормозной силы) осуществляется с помощью увеличения выпрямленного напряжения инвертора U_d путем изменения в сторону уменьшения угла β_p от 180 до 30 эл. град и, наоборот, при увеличении уклона пути (увеличения тормозной силы) – уменьшение U_d путем увеличения β_p . В генераторе в этом случае можно поддерживать соотношение $I_B / I_A \geq 0,5$ в более широком диапазоне высоких скоростей, чем в существующей системе. Поддержание такого соотношения токов необходимо для обеспечения нормальной машинной коммутации на коллекторе генератора.

Рассмотрим более подробно данный механизм повышения энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения.

Согласно [1], номинальные напряжения холостого хода тяговых обмоток трансформатора равны 1230 В (4-я зона), 922,5 (3-я зона), 615 В (2-я зона) и 307,5 В (1-я зона). Эти данные напряжений и коэффициенты трансформации трансформатора по зонам регулирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Напряжение и коэффициенты трансформации трансформатора электровоза ВЛ80Р по зонам регулирования

Номер зоны регулирования напряжения	1	2	3	4
Номинальное напряжение сетевой обмотки, В	25 000			
Напряжение холостого хода тяговых обмоток, В	307,5	615	922,5	1230
Коэффициент трансформации тягового трансформатора, K_T	81,3	40,6	27,1	20,3

На рис. 1 представлена упрощенная схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме электрического рекуперативного торможения.

В качестве примера на рис. 2 представлена диаграмма выпрямленного напряжения при работе инвертора на 4-й зоне регулирования. Известно, что регулирование среднего значения выпрямленного напряжения на 4-й зоне осуществляется с помощью подачи регулируемых импульсов управления с фазой β_p на тиристорные плечи V3 в одном полупериоде напряжения и V4 в другом полупериоде, находящихся внутри внешнего моста инвертора, образованного плечами V1, V2, V7 и V8. Плечи V3 и V4 присоединены к выводу 1 регулируемой секции а₁-1 вторичной обмотки трансформатора. В результате открытия данных плеч выпрямленное напряжение инвертора от регулируемой секции вычитается из выпрямленного напряжения инвертора от суммы всех секций вторичной обмотки трансформатора на 4-й зоне, что обеспечивает регулирование выпрямленного напряжения $U_{d(4)}$ 4-й зоны, а значит, и регулирование тока якоря генератора I_A согласно (1).

В то же время в момент времени β_p происходит переключение суммы секций а₁-1, 1-2 и 2-х₁ вторичной обмотки трансформатора, участвующих в образовании более высокой 4-й зоны, на сумму секций 1-2 и 2-х₁, участвующих в создании более низкой 3-й зоны (происходит переход с 4-й на 3-ю зону). В результате такого переключения происходит изменение коэффициента трансформации тягового трансформатора K_T с одной меньшей величины на другую большую вследствие того, что меняется (уменьшается) количество витков секций вторичной обмотки трансформатора, участвующих в процессе инвертирования.

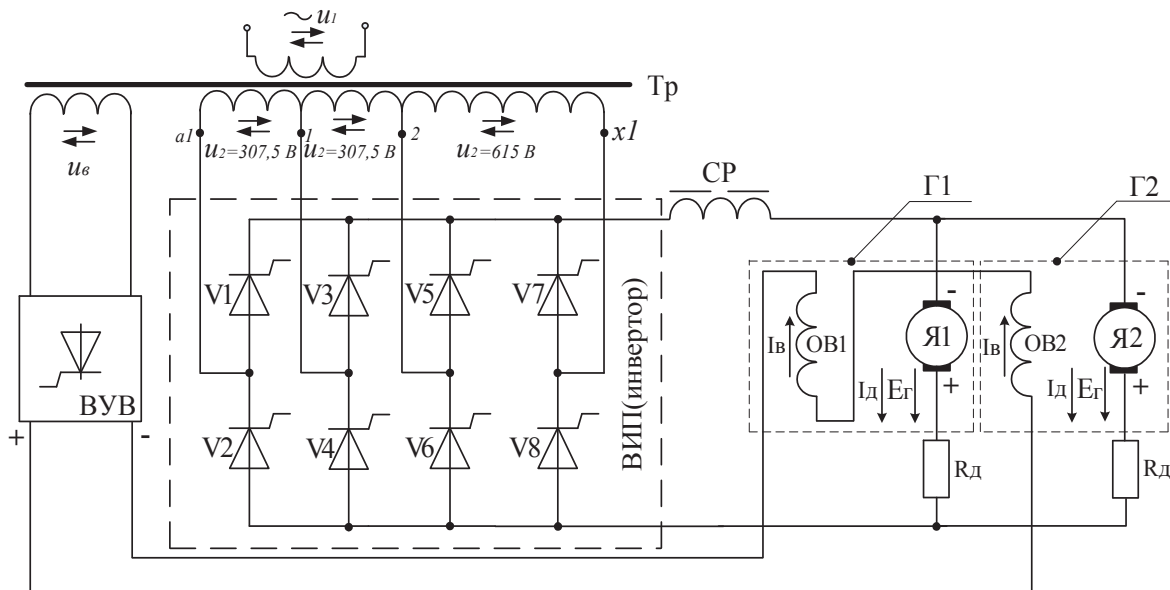


Рис. 1. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения:

Tr – трансформатор; ВИП (инвертор) – выпрямительно-инверторный преобразователь; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; СР – сглаживающий реактор; Г1 и Г2 – генераторы независимого возбуждения; Я – якорь генератора; ОБ – обмотка возбуждения генератора; R_d – добавочный резистор; V1 – V8 – тиристорные плечи ВИП

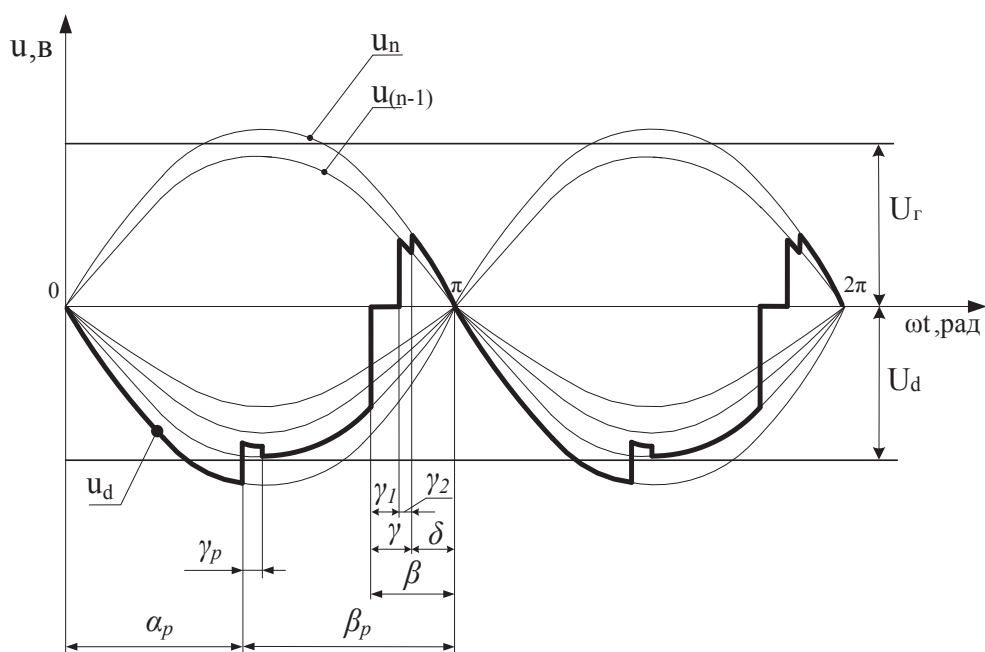


Рис. 2. Диаграмма выпрямленного напряжения при работе четырехзонного инвертора на 4-й зоне регулирования:

u_n и $u_{(n-1)}$ – переменное напряжение вторичной обмотки трансформатора, подаваемое на инвертор, на последующей n -й зоне регулирования кроме 1-й (при $n = 4$) и на предыдущей $(n-1)$ зоне; U_g – напряжение генератора; U_d – среднее выпрямленное напряжение инвертора; β – угол опережения инвертора; δ – угол запаса инвертора; γ_1 – угол коммутации большого контура; γ_2 – угол коммутации малого контура; γ – суммарный угол коммутации; γ_p – регулируемый угол коммутации; α_p – регулируемый угол управления инвертора; β_p – регулируемый угол опережения инвертора

Уменьшение количества витков приводит к уменьшению величины действующего значения напряжения $U_2 = U_{(3)}$ вторичной обмотки трансформатора, подаваемого на плечи инвертора на соответствующей более низкой (третьей) зоне регулирования (см. рис. 2).

Величина среднего выпрямленного напряжения U_d инвертора на холостом ходу в конце любой зоны регулирования (полная зона) определяется выражением, в котором выполняются следующие соотношения: $\beta_p = \beta$ и $\alpha_p = \pi - \beta_p$

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\pi-\beta}^{2\pi-\beta} U_m \cdot \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \Big|_{\pi-\beta}^{2\pi-\beta} - \cos \omega t =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} (-\cos \beta - \cos \beta) \cdot U = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U (-\cos \beta) = -\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \cdot \cos \beta. \quad (2)$$

Знак минус в (2) означает, что при инвертировании выпрямленное напряжение меняет свою полярность на обратную по отношению к выпрямлению. Величина среднего выпрямленного напряжения $U_{d(4)}$ инвертора, например, на 4-й зоне под нагрузкой без учета регулируемой коммутации γ_p в силу ее малости (допущение в этой статье) определяется выражением, в котором проделаны предварительные преобразования и выполняются следующие соотношения:

$$\beta = \delta + \gamma \quad \text{и} \quad \cos(\delta + \gamma) = \cos \delta - \frac{2X_T I_d K_{III}}{\pi},$$

$$U_{d(4)} = \frac{1}{\pi} \left(\int_{\pi-\delta}^{2\pi-\beta_p} \sqrt{2} U_{(4)} \cdot \sin \omega t d\omega t + \int_{2\pi-\beta_p}^{2\pi-\delta} \sqrt{2} \varepsilon U_{(4)} \cdot \sin \omega t d\omega t \right) =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{(4)} ((1 + \varepsilon) \cos \delta + (1 - \varepsilon) \cos \beta_p) - \frac{2X_T I_d K_{III}}{\pi} \quad (3)$$

где $\varepsilon = \frac{U_{(3)}}{U_{(4)}}$ – отношение действующих значений напряжений вторичной обмотки транс-

форматора на 3-й и 4-й зоне; $K_{III} = \frac{K_{T3}}{K_{T4}}$ – отношение коэффициентов трансформации

трансформатора 3-й и 4-й зоны; X_T – индуктивное сопротивление обмоток трансформатора на 4-й зоне; I_d – среднее значение выпрямленного тока инвертора.

Из теории электротехники переменного синусоидального тока известно, что между действующим значением переменного напряжения и его средним значением, которым является выпрямленное напряжение инвертора, существует зависимость в виде коэффициента формы K_Φ

$$K_\Phi = \frac{U}{U_d} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,1.$$

Опираясь на это соотношение при регулировании $U_{d(4)}$ на 4-й зоне путем изменения угла β_p , можно рассчитать изменение величины действующего значения переменного напряжения $U_{(4)}$ суммы трех секций вторичной обмотки тягового трансформатора, используемого в инверторе на 4-й зоне регулирования для инвертирования постоянного тока генератора в сеть.

Используя все эти данные, произведем расчет изменения среднего значения выпрямленного напряжения $U_{d(4)}$ и действующего значения переменного напряжения $U_{(4)}$ на 4-й зоне

в процессе изменения угла β_p от 180 до 30 эл. град, а также действующего значения переменного напряжения полной 3-й зоны $U_{(3)}$ без регулирования угла β_p , что эквивалентно началу 4-й зоны. Расчет выполним при условии номинальной токовой нагрузки для якорной цепи генератора ($I_a = 900$ А) и для инвертора ($I_d = 2 \square 900 = 1800$ А – инвертор нагружен на два генератора), а также при условии, что $\delta = 30$ эл. град, $K_T = 0,75$, $X_T = 0,05$ Ом. Результаты этого расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения напряжений $U_{d(4)}$ и $U_{(4)}$ на 4-й зоне в зависимости от угла β_p и $U_{(3)}$ на 3-й зоне без регулирования угла β_p при действии номинальной токовой нагрузки

β_p , эл. град	180	150	120	90	60	30
$U_{d(4)}$ (4-я зона), В	611,46	633,55	680,49	749,52	818,56	865,5
$U_{(4)}$ (4-я зона), В	678,72	703,24	755,34	831,96	908,60	960,70
$U_{(3)}$ (3-я зона), В	678,72	678,72	678,72	678,72	678,72	678,72

По данным табл. 2 можно рассчитать отношения величины действующего значения напряжения секций вторичной обмотки тягового трансформатора на 4-й зоне регулирования в зависимости от изменения величины угла β_p к действующему значению напряжения на полной 3-й зоне. Это отношение принимаем в качестве коэффициента регулирования K_p величины действующего значения переменного напряжения на 4-й зоне. В табл. 3 даны значения коэффициента регулирования K_p в зависимости от величины угла β_p .

Таблица 3

Значения коэффициента регулирования K_p в зависимости от величины угла β_p

β_p , эл. град	180	150	120	90	60	30
$K_p = \frac{U_{(4)}}{U_{(3)}}$	1,00	1,036	1,112	1,225	1,338	1,415

По расчетным данным табл. 3 построена зависимость $K_p = f(\beta_p)$ на 4-й зоне регулирования, представленная на рис. 3.

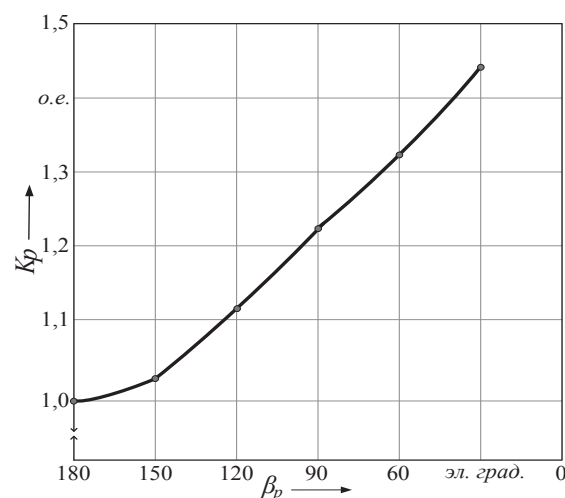


Рис. 3. Зависимость коэффициента регулирования K_p действующего значения напряжения вторичной обмотки трансформатора на 4-й зоне регулирования от величины угла β_p

Как было сказано выше, поддержание на 4-й зоне постоянной по величине скорости движения поезда на уклоне пути можно осуществить путем регулирования тока якоря генератора, сохраняя неизменным его ток возбуждения. В результате тормозная сила будет также регулироваться. Диапазон применения этих скоростей будет зависеть от величины уклона и других элементов профиля пути. В случае, когда величина уклона (спуска) пути уменьшается, требуется снижение тормозной силы электровоза с целью сохранения достигнутой ранее высокой скорости движения поезда. Для этого необходимо уменьшать ток якоря генератора $I_{я}$ путем увеличения U_d с помощью уменьшения угла β_p . Когда величина уклона увеличивается, то ток необходимо увеличивать путем уменьшения U_d с помощью увеличения угла β_p .

Известно, что коэффициент трансформации трансформатора K_T равен отношению витков или напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора, а при работе трансформатора под нагрузкой K_T можно определить и как отношение токов его вторичной и первичной обмоток

$$K_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (4)$$

В секции электровоза ВЛ80Р находится один тяговый трансформатор и два инвертора, каждый из которых нагружен на два параллельно включенных генератора. В итоге две пары параллельно включенных генераторов нагружены через свои инверторы на вторичные обмотки тягового трансформатора. В результате ток во вторичных обмотках трансформатора I_2 будет складываться из токов четырех генераторов, т.е. $I_2 = 4I_{я}$. Используя (4), получим следующее выражение:

$$I_1 = \frac{I_2}{U_1} U_2. \quad (5)$$

Для 4-й зоны, используя табл. 2, получим данные для расчета значений тока I_1 в первичной обмотке трансформатора при поддержании постоянным по величине тока I_2 во вторичной обмотке трансформатора в зависимости от значений напряжения $U_2 = U_{(4)}$, которые, в свою очередь, зависят от величины угла β_p .

Чтобы увеличить возврат тока рекуперации из электровоза в контактную сеть при условии поддержания постоянной высокой скорости движения и изменении профиля пути, необходимо ток якоря генератора $I_{я}$, а соответственно, и ток I_2 поддерживать постоянным во всем интервале изменения угла β_p . Согласно выражению (1), это можно сделать путем увеличения U_T через увеличение тока возбуждения I_B с одновременным увеличением U_d путем уменьшения угла β_p .

В диапазоне скоростей движения (50 – 80 км/ч) на 4-й зоне регулирования величину тока якоря генератора $I_{я}$ необходимо поддерживать в диапазоне 300 – 600 А.

В табл. 4 представлен расчет возврата в сеть тока рекуперации I_1 в первичной обмотке трансформатора на 4-й зоне регулирования при постоянстве различных величин тока якоря генератора $I_{я}$, а следовательно, и тока I_2 во вторичной обмотке трансформатора в зависимости от уменьшения угла β_p .

По расчетным данным табл. 4 построены графики зависимостей $I_1 = f(\beta_p)$ возврата тока рекуперации в первичной обмотке трансформатора I_1 на 4-й зоне регулирования при уменьшении угла β_p , представленные на рис. 4.

Полученные зависимости $I_1 = f(\beta_p)$ при неизменной высокой скорости во время регулирования напряжения инвертора U_d на 4-й зоне и при условии поддержания постоянной величины тока якоря генератора $I_{я}$ показывают, что с уменьшением угла β_p возврат тока I_1 в сеть увеличивается. В то же время с возрастанием самой величины тока якоря генератора $I_{я}$

возврат тока I_1 в контактную сеть увеличивается на большую величину в равных условиях изменения β_p .

Таблица 4

Возврат тока рекуперации I_1 в зависимости от уменьшения угла β_p

При условии $I_{Я} = 300 \text{ A}$ ($I_2 = 300 \cdot 4 = 1200 \text{ A}$) и $U_1 = 25 \text{ 000 V}$						
β_p , эл. град	180	150	120	90	60	30
U_2 , В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1 , А	32,5	33,7	36,2	39,9	43,6	46,1
При условии $I_{Я} = 400 \text{ A}$ ($I_2 = 400 \cdot 4 = 1600 \text{ A}$) и $U_1 = 25 \text{ 000 V}$						
U_2 , В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1 , А	43,4	45	48,3	53,2	58,1	61,4
При условии $I_{Я} = 500 \text{ A}$ ($I_2 = 500 \cdot 4 = 2000 \text{ A}$) и $U_1 = 25 \text{ 000 V}$						
U_2 , В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1 , А	54,2	56,2	60,4	66,5	72,6	76,8
При условии $I_{Я} = 600 \text{ A}$ ($I_2 = 600 \cdot 4 = 2400 \text{ A}$) и $U_1 = 25 \text{ 000 V}$						
U_2 , В	678,7	703,2	755,3	831,9	908,6	960,7
I_1 , А	65,2	67,5	72,5	79,9	87,2	92,2

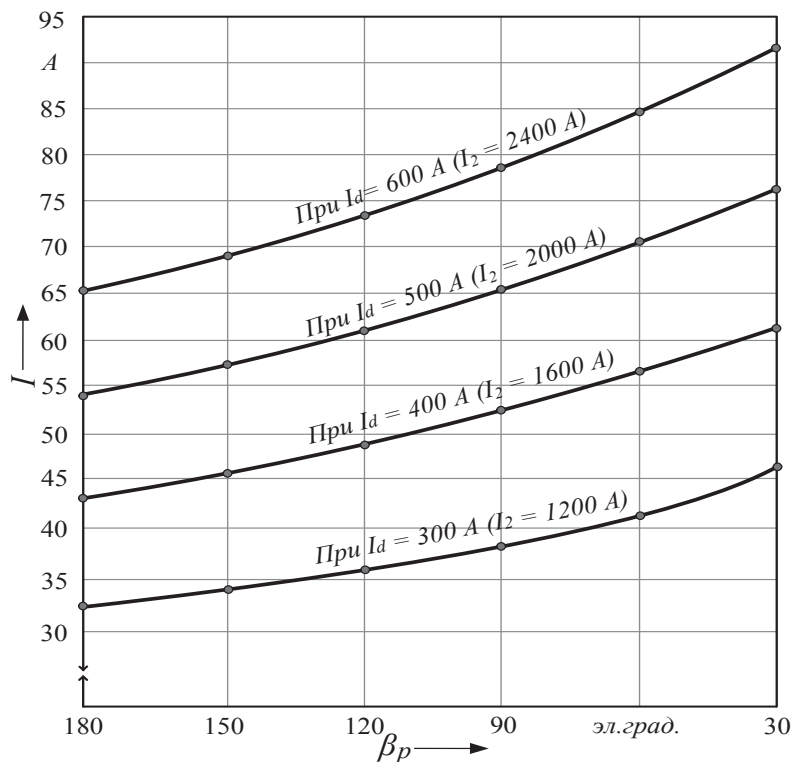


Рис. 4. Зависимость $I_1 = f(\beta_p)$ при регулировании U_d инвертора на 4-й зоне

Поддержание тока $I_{Я}$ по закону $I_{Я} = \text{const}$ возможно только в том случае, если одновременно с увеличением напряжения U_d на 4-й зоне посредством уменьшения угла β_p будет увеличиваться и напряжение генератора U_G путем увеличения его тока возбуждения I_B . Такой закон управления необходимо обеспечить с помощью системы автоматического регулирования.

Выводы:

1. Предложен способ расширения регулировочной области инвертора (свыше 3,5 зон) электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения по слежению за величиной тока якоря генератора, который позволяет повысить энергетическую эффективность рекуперативного торможения электровоза за счет уменьшения регулируемого угла опережения β_p .

2. С возрастанием величины тока якоря генератора $I_{\text{я}}$ возврат тока I_1 в контактную сеть увеличивается на большую величину в равных условиях изменения β_p .

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.
2. Электровоз ВЛ80Р: Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1985. – 622 с.
3. Кулинич, Ю. М. Повышение энергетической эффективности пассивного компенсатора электровоза переменного тока / Ю. М. Кулинич, В. К. Духовников // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 20-28.

Золотова Т. В., Прохорова М. С.
Tatiana V. Zolotova, Maria S. Prokhorova

ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ НА ФОНДОВОМ РЫНКЕ

INFORMATION ASPECTS OF AND TOOLS FOR STOCKMARKET SUSTAINABILITY ASSESSMENTS



Золотова Татьяна Валерьяновна – доктор физико-математических наук, доцент, профессор Финансового университета при Правительстве РФ (Россия, Москва). E-mail: tgold11@mail.ru

Ms. Tatyana V. Zolotova – Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor at the Financial University under the Government of the Russian Federation (Russia, Moscow). E-mail: tgold11@mail.ru.



Прохорова Мария Сергеевна – аспирант Московского педагогического государственного университета (Россия, Москва). E-mail: prokhorova.ms@yandex.ru

Ms. Maria S. Prokhorova – PhD student, Moscow State Pedagogical University (Russia, Moscow). E-mail: prokhorova.ms@yandex.ru.

Аннотация. В статье предложены показатели устойчивости и риска для отдельного инвестора и фондового рынка. Показано, что инвесторы, придерживаясь различных прогнозов развития фондового рынка, как следствие различной их информированности, будут выбирать разные стратегии, что способствует устойчивости данной системы. Предложен автоматизированный метод нахождения оптимального управления портфелем и исследования его на устойчивость.

Summary. In this paper we propose a set of stability/risks indexes for an individual investor and for the stock market as a whole. We demonstrate that investors being informed by different forecasts of the stock market development tend to adopt different action strategies, which facilitates stability of the system. We propose an automated method for identifying a portfolio's optimal management strategy and for testing its stability.

Ключевые слова: коэффициент корреляции, коэффициент риска, устойчивость, энтропия.

Key words: correlation coefficient, risk coefficient, stability, entropy.

УДК 35.073.5

Введение

Поведение инвесторов на фондовом рынке предполагает принятие ими решения о составе своих портфелей ценных бумаг. В основе рассматриваемой нами модели фондового рынка лежит предположение, что теоретически существует вероятностное распределение n -мерного вектора случайных величин доходностей r_i финансовых инструментов на фондовом рынке. При этом известно, что доходности являются взаимосвязанными случайными величинами, и мерой, определяющей эту взаимосвязь, служит ковариация (или корреляционный

момент [1]) доходностей. Практически на основании статистических данных за T предшествующих периодов имеются оценки математических ожиданий \bar{r}_i и корреляционных моментов σ_{ij} случайных величин r_i доходностей финансовых инструментов, $i, j = 1, \dots, n$. Будем считать, что фондовый рынок характеризуется вектором математических ожиданий доходностей финансовых инструментов $\bar{r} = (\bar{r}_1, \dots, \bar{r}_i, \dots, \bar{r}_n)$ и ковариационной матрицей $\sigma = (\sigma_{ij})_{n \times n}$. Это – объективная информация, доступная исследователю (биржевому аналитику). Инвесторы могут при принятии решений использовать эту объективную информацию или руководствоваться своей собственной субъективной информацией. Рассмотрим вопрос о влиянии поведения инвесторов в различных информационных условиях на показатели устойчивости стратегии отдельного инвестора и фондового рынка в целом.

В работе [2] рассмотрен вопрос оценки устойчивости сложных систем (например, фондового рынка) с использованием понятия коллективного риска. Под коллективным риском понимается непредсказуемость состояния некоторой системы (здесь фондового рынка) как результат индивидуального поведения ее подсистем (здесь группы лиц – инвесторов). В [2] получены оценки риска на фондовом рынке с использованием коэффициентов корреляции случайных величин доходностей, проведено исследование коллективного риска на фондовом рынке с разными структурными характеристиками и ограничениями инвестиционных портфелей, рассмотрен вопрос устойчивости.

В настоящей статье представлены результаты дальнейшего исследования в этой области. Предлагаются показатели (меры) риска и устойчивости стратегии отдельного инвестора на основе вычисления корреляции случайных значений доходностей его портфелей, построенных при различных экономических прогнозах. Разработана программа, которая, используя данный математический аппарат и статистическую информацию с фондового рынка, автоматизирует процесс нахождения оптимальной стратегии инвестора (состав портфеля), а также дает оценку риска его стратегии. Вначале кратко представлены полученные ранее результаты исследования корреляционной зависимости доходностей инвестиционных портфелей, которые используются в дальнейшем. Затем рассмотрены вопросы устойчивости для отдельного инвестора, описана программа, позволяющая автоматизировать процесс нахождения оптимальной стратегии инвестора и оценивать устойчивость этой стратегии.

Корреляционная зависимость доходностей оптимальных портфелей разных инвесторов и критерий устойчивости фондового рынка

Предположим сначала, что инвесторы одинаково информированы о ситуации на фондовом рынке и основывают свое поведение на единой объективной информации. Различие между ними заключается в отношении к риску, выражающееся в величине коэффициента в целевой функции, представляющей собой линейную свертку двух критериев: математического ожидания и дисперсии случайных доходностей портфелей.

Рассмотрим индивидуальное поведение инвестора, управление которого есть вектор x (портфель инвестиций), компоненты которого x_i – доли средств, вкладываемых в финансовые инструменты из конечного списка ($i = 1, \dots, n$). Определим оптимальный портфель из решения задачи на максимум линейной свертки критериев математического ожидания доходности портфеля и дисперсии доходности портфеля [9]

$$\max_{x \in X} \left[\sum_{i=1}^n \bar{r}_i x_i - \alpha \sum_{i,j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j \right], \quad (1)$$

где $X = \{x \mid x_i \geq 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_i = 1\}$, $\alpha > 0$ – весовой коэффициент, определяющий отношение инвестора к риску (коэффициент риска).

Нетрудно увидеть, что задача выбора оптимального портфеля (1) предполагает отсутствие коротких продаж, безрискового заимствования и кредитования (эти случаи рассмотре-

ны в [3]). Отметим также, что при оценке коллективного риска выбор линейной свертки критериев «математическое ожидание – дисперсия» для нахождения оптимального портфеля не является принципиальным; любые другие принципы оптимального выбора приводят к одному из эффективных портфелей, соответствующему определенному $\alpha > 0$ в задаче (1) (подробнее об этом в [4]).

В соответствии с [2] портфель называется полноразмерным, если у составляющего его вектора x все компоненты больше нуля. Для оценки устойчивости фондового рынка в целом нужно вычислить ковариации оптимальных портфелей инвесторов с различным отношением к риску, которое выражается разными значениями коэффициентов α . Решение задачи (1) приведено в [5], а именно, состав оптимального полноразмерного портфеля имеет вид

$$x^0(\gamma) = C_0 + C_1\gamma, \quad (2)$$

где $\gamma = \frac{1}{2\alpha}$, $\gamma \in (0; \infty)$, $e = (1, \dots, 1)$, $C_0 = (C_{01}, \dots, C_{0j}, \dots, C_{0n})$, $C_1 = (C_{11}, \dots, C_{1j}, \dots, C_{1n})$ определяются по формулам

$$C_0 = \frac{\sigma^{-1}e}{e\sigma^{-1}e}, \quad C_1 = \sigma^{-1}\bar{r} - \frac{e\sigma^{-1}\bar{r}}{e\sigma^{-1}e}\sigma^{-1}e. \quad (3)$$

Согласно (2), составы оптимальных портфелей x^{01} и x^{02} инвесторов имеют вид $x^{01} = C_0 + C_1\gamma_1$ и $x^{02} = C_0 + C_1\gamma_2$ соответственно. В [5] приведены необходимые и достаточные условия полноразмерности портфеля, а также показано, что ковариация случайных величин доходностей r_{x^1} и r_{x^2} двух произвольных портфелей, имеющих составы x^1 и x^2 , вычисляется по формуле

$$\text{cov}(r_{x^1}, r_{x^2}) = x^1\sigma x^2. \quad (4)$$

В [5] доказана теорема о положительной ковариации $\text{cov}(r_{x^{01}}, r_{x^{02}})$ доходностей двух полноразмерных оптимальных портфелей при условии $\det\sigma \neq 0$ и положительной ковариации доходностей любых двух оптимальных портфелей при условии строгой положительной определенности матрицы σ . Отметим, что ковариация доходностей двух произвольных портфелей вычисляется с использованием объективной ковариационной матрицы σ , характеризующей рынок, т.е. по формуле (4), независимо от того, какой субъективной информацией пользуются инвесторы при формировании своих портфелей. Поэтому, очевидно, утверждения этой теоремы остаются в силе в случае, если инвесторы основывают свое поведение на единой информации относительно прогноза вектора доходностей финансовых инструментов, который не обязательно является вектором математических ожиданий случайных величин доходностей, как это предполагалось ранее.

Традиционно предполагается, что инвесторы одинаково информированы (например, используют объективную информацию) о ситуации на финансовом рынке и различие в их поведении связано с их неодинаковым отношением к риску (выбор коэффициента α). Предположим теперь, что инвесторы имеют разную информацию (субъективная информация) о ситуации, складывающейся на финансовом рынке. Такое предположение подразумевает, что инвесторы по-разному оценивают математические ожидания доходностей финансовых инструментов, составляющих портфель (ковариационная матрица считается единой). Рассмотрим двух инвесторов, которые определили свои оптимальные портфели x^{01} и x^{02} согласно (2), (3). При этом значения параметра γ и значения математических ожиданий доходностей у этих инвесторов различны. Если первый инвестор имеет вектор ожидаемых доходностей \bar{r}^1 , а второй – \bar{r}^2 , то составы оптимальных портфелей x^{01} и x^{02} инвесторов имеют вид $x^{01} = C_0 + C_1^1\gamma_1$ и $x^{02} = C_0 + C_1^2\gamma_2$ соответственно, где C_1^1 и C_1^2 определяются по формулам

$$C_0 = \frac{\sigma^{-1}e}{e\sigma^{-1}e}, \quad C_1^1 = \sigma^{-1}\bar{r}^1 - \frac{e\sigma^{-1}\bar{r}^1}{e\sigma^{-1}e}\sigma^{-1}e, \quad C_1^2 = \sigma^{-1}\bar{r}^2 - \frac{e\sigma^{-1}\bar{r}^2}{e\sigma^{-1}e}\sigma^{-1}e.$$

В [5] доказана теорема об отрицательной ковариации $\text{cov}(r_{x^{01}}^1, r_{x^{02}}^2)$ двух полноразмерных оптимальных портфелей, если $\det \sigma \neq 0$, причем \bar{r}^1 , \bar{r}^2 и σ такие, что выполняется условие

$$(e\sigma^{-1}\bar{r}^1)(e\sigma^{-1}\bar{r}^2) - (\bar{r}^1\sigma^{-1}\bar{r}^2)(e\sigma^{-1}e) > \frac{1}{\gamma_1\gamma_2}. \quad (5)$$

Условие (5) характеризует степень различия оценок, которая приводит к отрицательной ковариации. При этом предположение о единой оценке ковариационной матрицы не является существенным. Различные оценки ковариационной матрицы отразятся на составах их оптимальных портфелей, которые, естественно, и в этом случае могут быть отрицательно коррелированы, изменится лишь вид условия (5).

Из результатов анализа вытекает, что оптимальные портфели имеют положительную ковариацию, причем, чем ближе значения коэффициентов α инвесторов, т.е. сходно их отношение к риску, тем ближе к единице коэффициенты корреляции их портфелей. В отличие от равновесной модели САРМ [8], в которой тоже исследуется коллективное поведение инвесторов, в нашей работе рассматриваются вопросы снижения коллективного риска на фондовом рынке вне ситуации равновесия. В зависимости от характера переходных процессов (скорости, амплитуды) могут возникнуть значительные колебания рынка, а в поведении инвесторов – известный в теории игр «эффект толпы» (например, массовый переход в кеш), что может привести (как и было недавно) к обвалу. Поэтому положительная ковариация случайных величин доходностей является одним из существенных факторов неустойчивости.

Так как инвесторы не обязаны вести себя на фондовом рынке оптимально (например, согласно (1)), то их портфели могут иметь как положительную, так и отрицательную ковариацию. Значит, однотипное поведение инвесторов может вызывать большие колебания рынка, а разнотипное гасит колебания рынка, т.е. хеджирует коллективный риск. Поэтому для оценки и прогнозирования коллективного риска нами ранее была введена мера разнообразия портфелей, основанная на понятии энтропии рынка [4]. При этом в качестве меры устойчивости фондового рынка взято отношение его энтропии к максимальному значению энтропии. При увеличении значения такого отношения (приближении к единице) увеличивается разнообразие портфелей и уменьшается коллективный риск на фондовом рынке. Если в системе имеется центральный регулирующий орган, то в качестве способа снижения коллективного риска он может использовать механизм различного информирования подсистем.

Вопросы информированности и критерий устойчивости стратегии инвестора

Рассмотрим одного инвестора, который не только располагает своей собственной субъективной информацией о ситуации на фондовом рынке, но и имеет возможность на основе этой информации строить различные прогнозы цен (доходностей) финансовых инструментов. Пусть $\bar{r}(y)$ – вектор математических ожиданий доходностей финансовых инструментов, зависящий от значения внешних (неконтролируемых) факторов y , описание которых включает указание вида неконтролируемых факторов и информированности о них инвестора (например, законы распределения случайных величин, множество значений неопределенных факторов, правила передачи информации в системе, способы обработки информации). Ковариационная матрица по-прежнему считается единой для всех инвесторов. Тогда задача (1) примет вид

$$\max_{x \in X} \left[\sum_{i=1}^n \bar{r}_i(y)x_i - \alpha \sum_{i,j=1}^n \sigma_{ij}x_ix_j \right], \quad (6)$$

а состав оптимального полноразмерного портфеля имеет вид

$$x^0(\gamma, y) = C_0 + C_1(y)\gamma, \quad (7)$$

где $C_0 = \frac{\sigma^{-1}e}{e\sigma^{-1}e}$, $C_1(y) = \sigma^{-1}\bar{r}(y) - \frac{e\sigma^{-1}\bar{r}(y)}{e\sigma^{-1}e}\sigma^{-1}e$.

Значит, согласно (6), (7) оптимальное управление инвестора (состав портфеля) зависит теперь не только от отношения инвестора к риску (выбор параметра α), но и от предпо-

лагаемого инвестором сценария развития экономической ситуации, характеризуемой информацией о значениях внешних факторов y (например, цена на нефть, валютный курс, рост ВВП и др.). Для двух сценариев имеем два вектора значений внешних факторов y^1 и y^2 и соответственно две оценки вектора математических ожиданий доходностей $\bar{r}(y^1)$ и $\bar{r}(y^2)$. Примером может служить многофакторная модель [8], в которой математические ожидания доходностей финансовых инструментов линейно зависят от значений ряда факторов. Тогда составы двух оптимальных полноразмерных портфелей одного инвестора согласно (7) есть $x^0(\gamma, y^1) = C_0 + C_1(y^1)\gamma$ и $x^0(\gamma, y^2) = C_0 + C_1(y^2)\gamma$.

Оценим ковариацию случайных величин доходностей двух разных портфелей одного инвестора, имеющих составы $x(\gamma, y^1)$ и $x(\gamma, y^2)$. По формуле (4) имеем

$$\text{cov}(r_{x(\gamma, y^1)}(y^1), r_{x(\gamma, y^2)}(y^2)) = x(\gamma, y^1)\sigma x(\gamma, y^2). \quad (8)$$

Можно считать оптимальное управление $x^0(y)$ (состав портфеля) инвестора устойчивым, если в пределах изменения информации (прогноза) ковариация портфелей остается положительной. Отметим, что в случае оценки риска фондового рынка в целом положительная ковариация портфелей разных инвесторов является фактором неустойчивости рынка [4]. Положительная же ковариация разных портфелей одного инвестора говорит об устойчивости управления конкретного инвестора, т.е. при рассматриваемых сценариях развития экономической ситуации случайные значения доходностей его портфелей имеют тенденцию меняться в одну сторону. Величина, представленная формулой (8), является оценкой риска отдельного инвестора, но при этом очевидно не является оценкой коллективного риска.

Из результатов предыдущего пункта непосредственно вытекает, что ковариация $\text{cov}(r_{x^0(\gamma, y^1)}(y^1), r_{x^0(\gamma, y^2)}(y^2))$ двух полноразмерных оптимальных портфелей $x^0(\gamma, y^1)$ и $x^0(\gamma, y^2)$ инвестора положительна, если $\det \sigma \neq 0$ и $\bar{r}(y^1)$, $\bar{r}(y^2)$, σ такие, что выполняется условие

$$(e\sigma^{-1}\bar{r}(y^1))(e\sigma^{-1}\bar{r}(y^2)) - (\bar{r}(y^1)\sigma^{-1}\bar{r}(y^2))(e\sigma^{-1}e) < \left(\frac{1}{\gamma}\right)^2. \quad (9)$$

Автоматизация процессов принятия решений инвестором

Предлагается программа, написанная на языке программирования Visual Basic, использующая математическую модель (6) для нахождения оптимального состава портфеля (блок 1) и формулу (8) для оценки ковариации случайных величин доходностей двух разных портфелей одного инвестора (блок 2). Состав оптимального портфеля определялся на основе использования статистических данных стоимостей акций Газпрома, Лукойла и Сбербанка за последний период с января по апрель 2013 г. (вектор значений неконтролируемого фактора y^1) [10] (эту информацию будем считать объективной). Работа блока 1 программы описана в [6; 7]. На рис. показан фрагмент работы блока 1 и 2 программы. Во фрейме «Обработка статистической информации» можно посмотреть доходности ценных бумаг каждую неделю, СКО и ковариацию ценных бумаг. Во фрейме «Модель с задаваемым отношением к риску» пользователь задает коэффициент риска α , после чего программа определяет оптимальный состав портфеля. Состав этого портфеля $x^{01} = (0.73, 0, 0.27)$ содержится во фрагменте программы на рис.

Если инвестор предполагает, что сценарий развития экономической ситуации, характеризуемый информацией о значениях стоимостей этих ценных бумаг, аналогичен прошлой экономической ситуации за период с января по апрель 2012 г. (вектор значений неконтролируемого фактора y^2), то получаем другой состав портфеля $x^{02} = (0, 0.83, 0.17)$.

Во фрейме «Оценка устойчивости выбора инвестора» пользователь фиксирует полученные составы портфелей инвестора. После нажатия кнопки «ОЦЕНИТЬ УСТОЙЧИВОСТЬ» программа вычисляет значение ковариации случайных значений доходностей этих

портфелей. В данном случае значение ковариации $\text{cov}(r_{x(\gamma, y^1)}(y^1), r_{x(\gamma, y^2)}(y^2)) = 0,265$, т.е. стратегия инвестора является устойчивой.

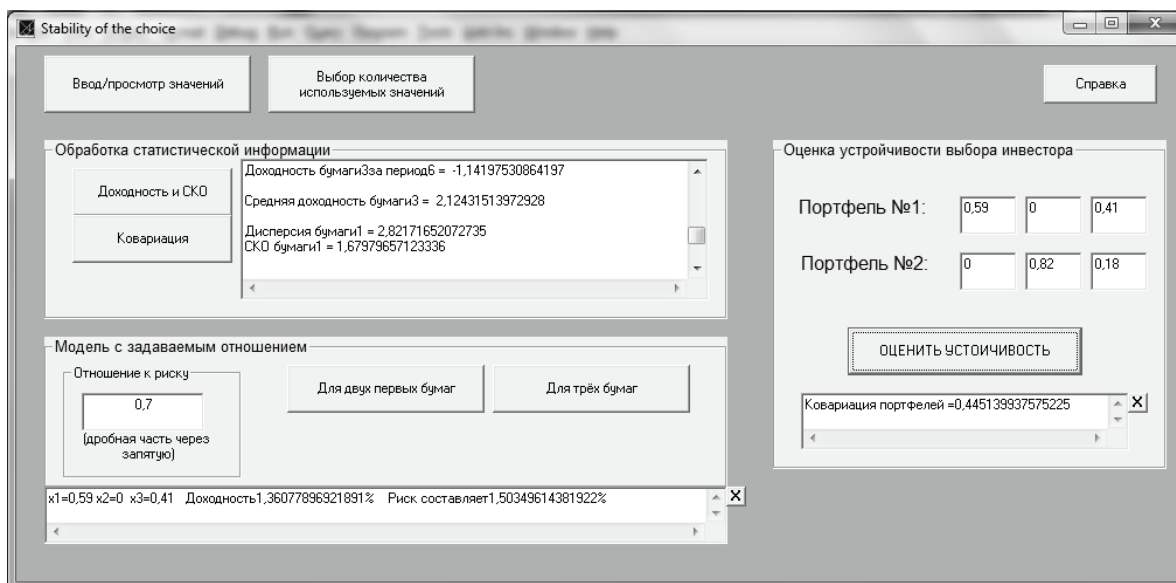


Рис. Фрагмент работы программы

Заключение

Таким образом, однотипное поведение инвесторов (оптимизация портфеля при одинаковой информированности) даже при разном отношении к риску является фактором неустойчивости фондового рынка. С другой стороны, инвесторы, придерживаясь различных прогнозов развития фондового рынка, как следствие различной их информированности (более или менее информированы, по-разному информированы), будут иметь возможность оценивать устойчивость своей собственной стратегии [11], а также выбирать разные стратегии (портфели) и тем самым обеспечивать устойчивость всей системы (фондового рынка). Предложенная авторами программа поможет выбрать оптимальный состав портфеля и провести исследование на устойчивость в автоматическом режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 2007. – 206 с.
2. Горелик, В. А. Модели оценки коллективного и системного риска / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Научное издание. – М.: ВЦ РАН, 2011. – 163 с.
3. Горелик, В. А. О некоторых обобщениях результатов исследования корреляции доходностей инвестиционных портфелей / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. – М.: ВЦ РАН, 2012. – С. 40-52.
4. Горелик, В. А. Оценка корреляции доходности инвестиционных портфелей и устойчивость фондового рынка / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Финансовый журнал. – М.: «Государственный университет Минфина России», 2012. – № 3. – С. 43-52.
5. Горелик, В. А. Некоторые вопросы оценки корреляции доходностей инвестиционных портфелей / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Проблемы управления. – М.: ИПУ РАН, 2011. – № 3. – С. 36-42.
6. Зверева, М. С. (Прохорова М. С.) Вопросы автоматизации процесса оптимального выбора с учетом риска / М. С. Зверева (М. С. Прохорова) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г. И. Носова, 2011. – № 2. – С. 42-44.



7. Золотова, Т. В. Инструментальная система управления портфелем ценных бумаг / Т. В. Золотова, М. С. Прохорова // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 42-й науч.-техн. конф. аспирантов и студентов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2012. – Ч. 3 – С. 244-245.
8. Шарп, У. Инвестиции / У. Шарп, Г. Александер, Дж. Бейли; пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 2004. – Т. XII. – 1028 с.
9. Markowitz H.M. Portfolio selection // Journal of Finance. – 1952. – № 7. – P. 77-91.
10. <http://news.yandex.ru/quotes/29.html>
11. Горелик, В. А. Динамическая минимаксная задача управления риском / В. А. Горелик, Т. В. Золотова, М. С. Прохорова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2012. – № II-1(10). – С. 38-47.

Бердонос В. Д., Животова А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Бердонос В. Д., Животова А. А.

Viktor D. Berdonosov, Alena A. Zhivotova

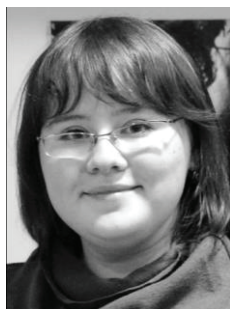
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

THE EVOLUTION OF THE OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING LANGUAGES



Бердонос Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Интернациональный, 59 – 5; +7(962) 287-51-41. E-mail: ktriz@knastu.ru.

Mr. Victor D. Berdonosov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681024, Komsomolsk-on-Amur, International Av., 59 – 5; +7(962) 287-51-41. E-mail: ktriz@knastu.ru.



Животова Алена Анатольевна – студентка магистратуры по направлению «Прикладная информатика» кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Октябрьский, 36 – 52; +7(909) 899-81-28. E-mail: zhivotova.aa@gmail.com.

Ms. Alena A. Zhivotova – MA student of Applied Information Technology, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681024, Komsomolsk-on-Amur, Oktober Av., 36 – 52. +7(909) 899-81-28. E-mail: zhivotova.aa@gmail.com.

Аннотация. В статье проанализирована эволюция механизмов объектно-ориентированного программирования на примере языков: Simula-67; Smalltalk; C++; Eiffel; Python; Java; Delphi; Perl 6; C#; Scala; PHP; Objective C; Ruby. Определены главные противоречия, которые стали «движущими силами» новых механизмов, приёмы разрешения этих противоречий на основе ТРИЗ-инструментов. Систематизированы знания о существующих механизмах реализации объектно-ориентированного подхода в разных языках программирования.

Summary. The paper reviews the evolution of object-oriented programming exemplified by such languages as Simula-67; Smalltalk; C++; Eiffel; Python; Java; Delphi; Perl 6; C#; Scala; PHP; Objective C; Ruby. We reveal the key contradictions that has been the “moving forces” for the appearance of new mechanisms; we suggest relevant solutions to these contradictions based on the TRIZ tools. We also propose a systematization of the knowledge of such mechanisms existing in different object-oriented programming languages.

Ключевые слова: ТРИЗ-эволюция, приемы разрешения технических противоречий, законы развития технических систем, объектно-ориентированное программирование.

Key words: TRIZ-evolution, inventive principles, laws of Technical Systems Evolution, object-oriented programming

УДК 025.4

Введение

На сегодняшний день количество прикладных языков программирования, реализующих объектно-ориентированную парадигму, является наибольшим по отношению к другим парадигмам программирования.



Практически все широко используемые языки являются объектно-ориентированными, развивая и совершенствуя прикладные средства реализации объектно-ориентированных возможностей. В образовательном процессе в силу ограниченности времени при изучении объектно-ориентированного программирования (ООП) рассматриваются, как правило, возможности какого-либо одного языка, что приводит к игнорированию полезных и эффективных механизмов ООП в других языках. Таким образом, является актуальной систематизация знаний об объектно-ориентированном подходе к программированию и его реализации в различных языках программирования.

Для достижения поставленной цели был выбран ТРИЗ-эволюционный подход. Кроме того, были использованы следующие инструменты ТРИЗ: приемы разрешения технических противоречий; законы развития технических систем [1].

ТРИЗ-эволюционный подход

Концепция ТРИЗ-эволюционности знаний [9; 10; 11] позволяет наметить подходы к разрешению основного противоречия образования между объёмом передаваемых знаний и временем на их освоение. Существует фрактальный подход к исследованию объектов различной природы [14]. Укрупненно развитие (эволюция) фрактального объекта происходит следующим образом. Исходный объект (паттерн) в соответствии с правилами эволюции (законами эволюции), используя ресурсы окружающей среды, многократно воспроизводится (копируется), увеличивая при этом свою «сложность». Аналогично фрактальному подходу был предложен ТРИЗ-эволюционный подход к искусственным объектам, который также может быть применён и к эволюции знаний [9]. Сначала для выбранной области знаний определяются исходные положения – аксиомы, что эквивалентно паттернам. Затем выявляются и оцениваются ресурсы соответствующей области знаний. Наконец выявляются правила «строительства» на основе инструментария ТРИЗ. Эволюцию почти любого искусственного объекта можно рассматривать как «рост дерева». Сначала появляется росток (моноэлемент), затем по мере роста появляются тонкие веточки (полиэлементы), которые впоследствии развиваются в толстые ветви, из которых в свою очередь растут новые тонкие ветви.

Такой ТРИЗ-эволюционный подход был использован при структурировании знаний по численным методам [10], по CASE-системам [11], по парадигмам программирования [12].

В целом в процесс исследования ТРИЗ-эволюции входят:

- описание исходного объекта;
- выявление противоречий у выбранного объекта;
- определение инструментов ТРИЗ, позволяющих разрешить выявленные противоречия;
- описание последующих объектов, в которых разрешены отдельные противоречия;
- и так далее для всех наиболее значимых объектов исследуемой области;
- построение и анализ ТРИЗ-эволюционной карты.

Об объектно-ориентированном программировании

Основу любого объектно-ориентированного языка программирования составляет объектно-ориентированный подход, строящийся на технической основе, элементы которой образуют объектную модель проектирования, которая объединяет в себе принципы абстракции, инкапсуляции, полиморфизма, модульности и иерархии [3].

В целом на сегодняшний день нет точного определения ООП или объектно-ориентированного языка программирования. В различной литературе авторы дают различное разъяснение этим терминам. Основываясь на этих определениях [2; 3; 8], определим объектно-ориентированный язык программирования как язык программирования, в качестве базовых элементов которого выступают объекты, имеющие собственные свойства и методы и образующие иерархически организованные классы объектов.

Концептуальную базу объектно-ориентированного подхода к разработке программ составляют четыре основных механизма [3]: абстракция, инкапсуляция, полиморфизм, наследование.

С момента зарождения объектно-ориентированного подхода концептуальная база ООП развивалась и эволюционировала вместе с языками, реализующими данный подход к программированию. Каждый более поздний элемент в наборе механизмов расширяет функциональные возможности языка в рамках реализации ООП.

Наряду с методологией построения программного обеспечения также, несомненно, важны особенности конкретного языка программирования, поскольку в конечном счете наши конструкции должны быть выражены на каком-то языке.

Выделим группу механизмов, которая определяет особенности разработки программ на том или ином языке программирования: синтаксис, структура программы, отладка.

С развитием языков программирования перечисленные механизмы также эволюционировали и на данный момент представляют собой наборы элементов, в разной степени реализуемые в языках программирования.

Построим и проанализируем ТРИЗ-эволюционную карту механизмов ООП на основе анализа развития объектно-ориентированных языков программирования.

Для наглядности также построим S-образную кривую развития языков программирования, откладывая по вертикальной оси оценку языка с точки зрения реализации объектно-ориентированных возможностей.

Объектно-ориентированные языки программирования

Рассмотрим, под действием каких движущих сил произошла первая итерация ТРИЗ-эволюции.

Первым объектно-ориентированным языком был Simula-67. Его идеи и концепции легли в основу последующих объектно-ориентированных языков программирования. То есть язык Simula-67 является тем «паттерном», с которого начинается ТРИЗ-эволюция ООП. Язык Simula-67 был построен на основе языка Algol-60 [4]. Особенностью Simula-67 является наличие у объекта параметров. Simula-объект – это программная компонента, характеризующаяся некоторыми атрибутами (данными и процедурами) и способная выполнять определенные действия, описываемые ее правилами действий.

Язык можно охарактеризовать набором механизмов реализации объектно-ориентированных возможностей (см. рис. 1). Simula-67 выступает «первенцем» ООП, и набор механизмов в языке нельзя назвать идеальным. С увеличением сложности решаемых объектно-ориентированных задач разработчики столкнулись с рядом противоречий.

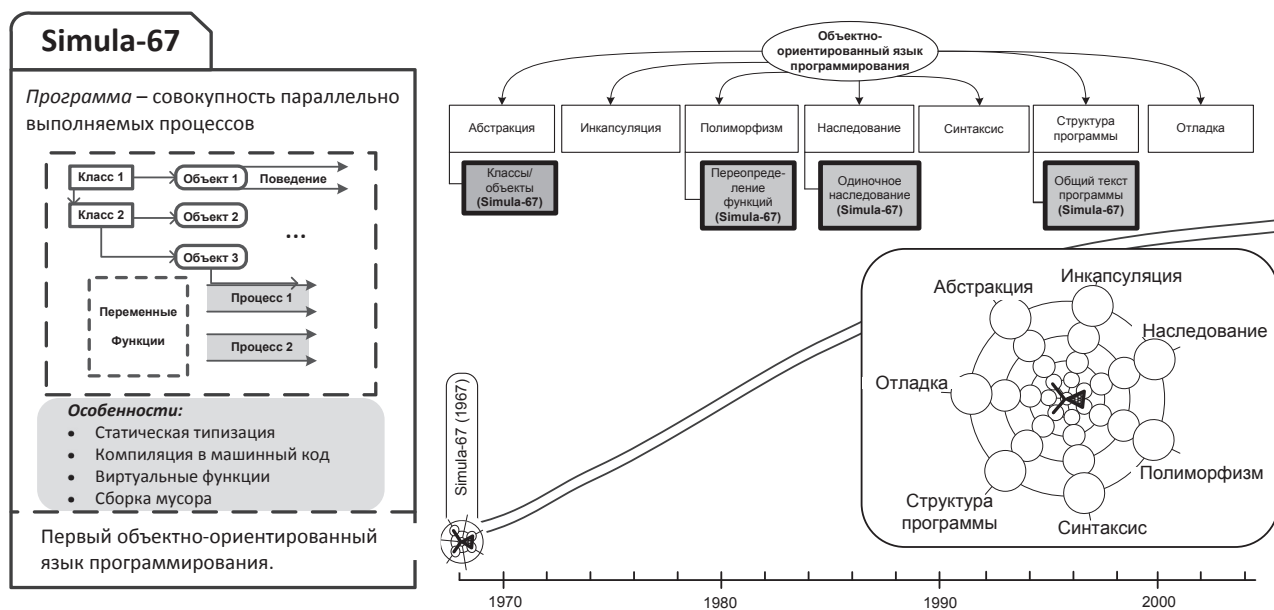


Рис. 1. Фрейм языка Simula-67 и положение языка Simula-67 на S-образной кривой

В языке для выполнения однотипных операций с различными типами данных используются разные функции, т.е. с увеличением количества типов данных недопустимо увеличивается количество функций, обозначающих одно и то же действие (противоречие 1).

Также существенными недостатками языка являются отсутствие средств для отладки приложения и необходимость выполнения определенного алгоритма действий для запуска программы. При отладке крупных приложений на выполнение этого алгоритма и поиск причины ошибки, не выявленной компилятором, тратится много времени, т.е. с увеличением сложности разрабатываемого ПО недопустимо увеличивается время на отладку программы (противоречие 2). Также такие ошибки приводят к аварийному завершению программы. И чем больше объем кода, тем больше вероятность пропустить подобную ошибку, т.е. с увеличением объема кода недопустимо снижается надежность программы (противоречие 3).

Кроме того, при реализации механизма одиночного наследования в языке возникает противоречие: с увеличением количества возможных классов-родителей недопустимо увеличивается объем дублируемых данных (противоречие 4).

Перечисленные выше и другие противоречия были разрешены в языках Smalltalk-80, C++, Eiffel.

Основная особенность языка Smalltalk (см. рис. 2) в том, что все переменные являются объектами, взаимодействие между которыми происходит через обмен сообщениями. Классы хранятся в дереве классов и связаны отношением наследования. При этом любой класс является объектом класса более высокого порядка. Написание программы на языке Smalltalk заключается в последовательном изменении состояния ее объектов [13]. Использование механизма компиляции в промежуточное представление позволяют запускать программу на аппаратных платформах, где поддерживается виртуальная машина Smalltalk.

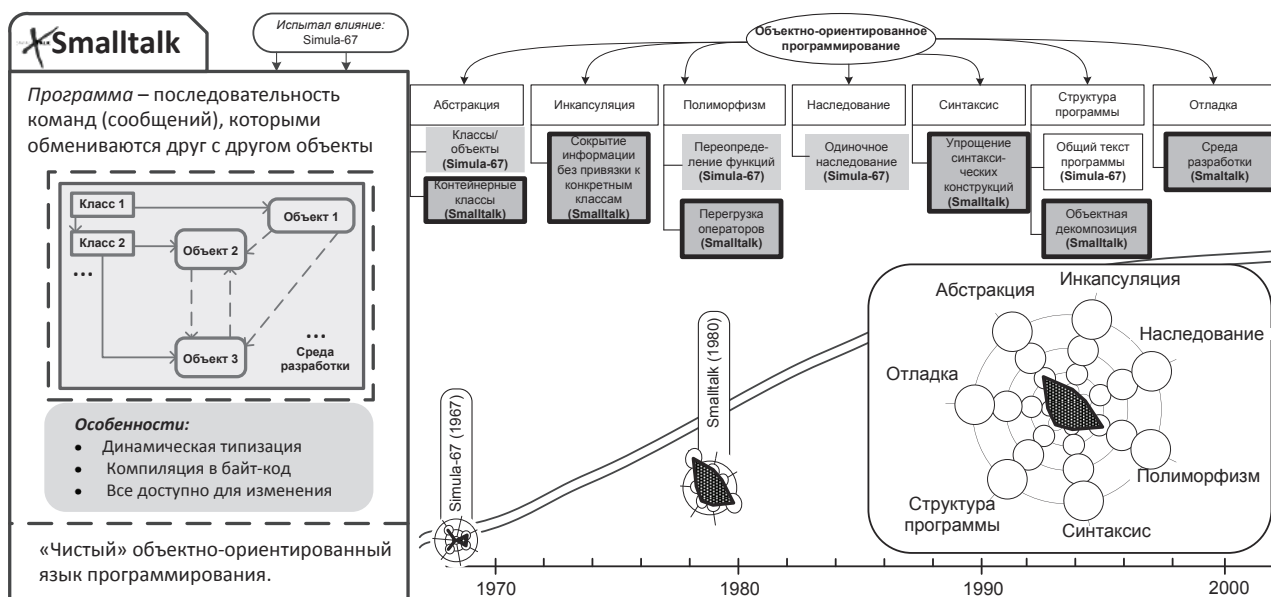


Рис. 2. Фрейм языка Smalltalk и положение языка Smalltalk на S-образной кривой

Часть противоречий Simula-67 была разрешена в языке Smalltalk-80 следующими инструментами ТРИЗ. Например, при использовании приема «универсальности» в язык была добавлена возможность перегрузки операторов, т.е. возможность одновременного существования в одной области видимости нескольких различных вариантов применения оператора, имеющих одно и то же имя, но различающихся типами параметров, к которым они применяются (решение 1.1). С помощью закона перехода в надсистему создана среда разработки программы, обладающая пользовательским интерфейсом и предоставляющая средства для отладки программ (решение 2.1).

Таким образом, в языке появилось большое количество новых механизмов реализации ООП. Произошла первая итерация ТРИЗ-эволюции (см. рис. 3).



Рис. 3. Первая итерация ТРИЗ-эволюции механизмов ООП

Несмотря на то, что в языке Smalltalk-80 была разрешена часть противоречий Simula-67, Smalltalk-80 унаследовал ряд противоречий этого языка.

Далее рассмотрим язык C++ (см. рис. 4), это один из популярных объектно-ориентированных языков программирования, созданный в 1983 году Б. Страуструпом [7]. Результатами создания экземпляров в языке являются просто объекты, или объявления данных. Классы могут называть один или несколько родительских классов, обеспечивая наследование и множественное наследование соответственно [6]. В C++ введена возможность описания параметризованных классов и функций (шаблонов), а также возможность описания обработки исключительных ситуаций в программе.

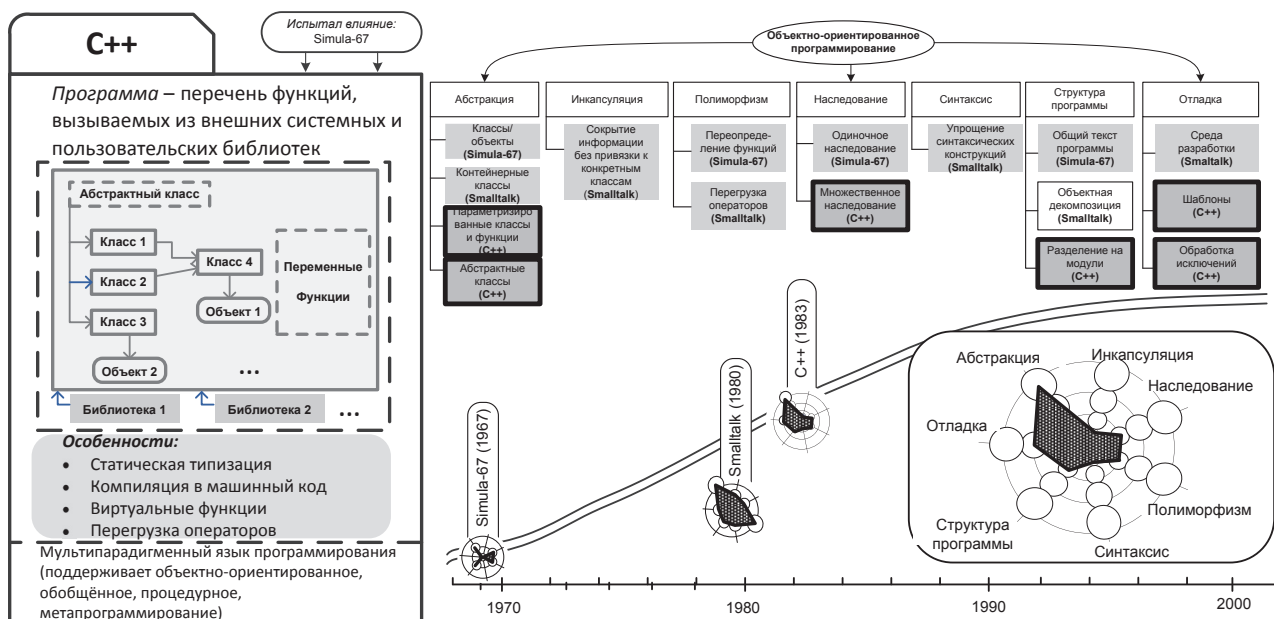


Рис. 4. Фрейм языка C++ и положение языка C++ на S-образной кривой

В языке C++ при использовании приема «самообслуживание» к языку была добавлена возможность обработки исключительных ситуаций. Данный механизм предназначен для описания реакции программы на ошибки во время выполнения (решение 2.2).

При использовании приема «универсальность» совместно с приемом «наоборот» к языку была добавлена возможность описания шаблонов, при инициализации которых аргументами выступают типы значений, а не сами значения. В целом шаблоны – средство языка, предназначенное для кодирования обобщенных алгоритмов без привязки к некоторым параметрам (решение 3.1).

При использовании приема «объединение» были введены возможность объединения дублируемых параметров в одном из классов и возможность объекту наследовать несколько классов, т.е. появился механизм множественного наследования (решение 4.1).

Таким образом, произошла вторая итерация ТРИЗ-эволюции (см. рис. 5).

Для языка C++ также существует ряд противоречий. Например, использование технологии множественного наследования порождает проблемы, связанные с неоднозначностью выбора из одноименных методов родительских классов. Например, если вызвать метод для объекта Show() и в классе его не окажется, но в классах-родителях будет присутствовать метод Show(), определенный по-своему, то какой из методов должен быть вызван? Таким образом, с увеличением количества классов-предков при множественном наследовании недопустимо увеличивается неоднозначность выбора одноименных методов (противоречие 5).

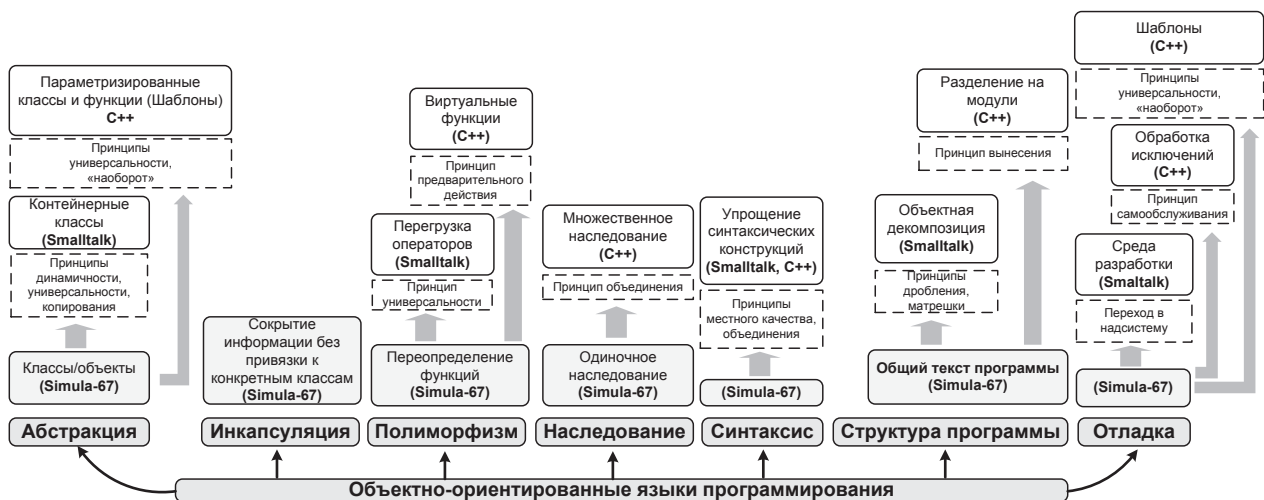


Рис. 5. Вторая итерация ТРИЗ-эволюции механизмов ООП

Далее рассмотрим язык Eiffel (см. рис. 6). Eiffel не мультипарадигменный язык, он не позволяет сочетать в одной программе несколько стилей. В Eiffel есть несколько важных черт, поддерживающих жесткий стиль программирования, таких как параметризованные классы, утверждения и исключения.

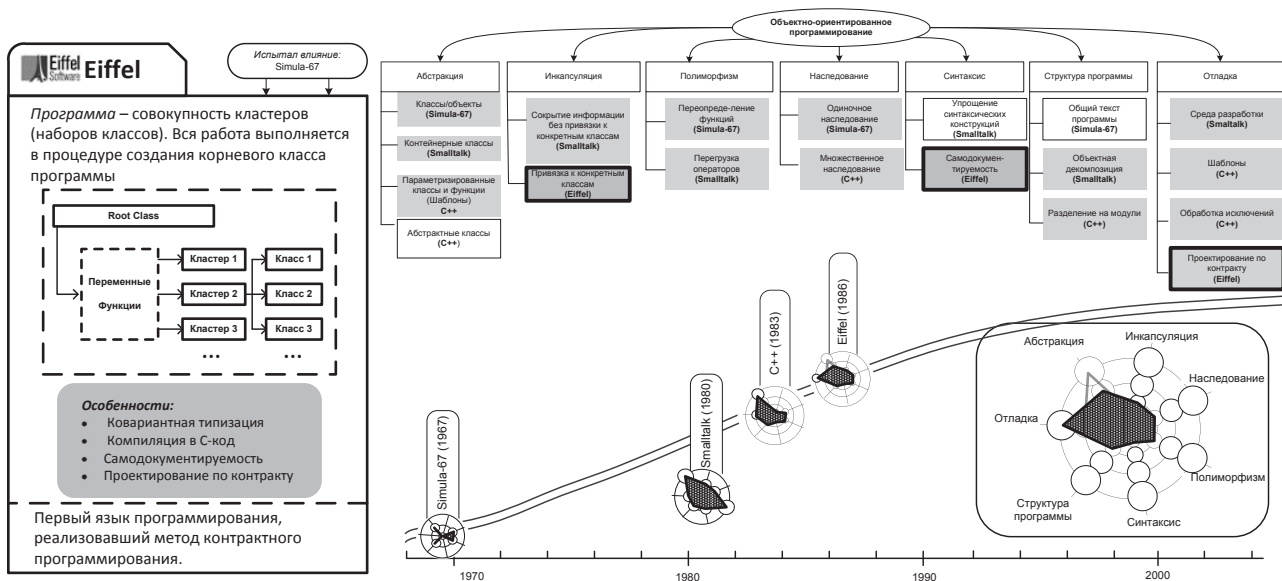


Рис. 6. Фрейм языка Eiffel и положение языка Eiffel на S-образной кривой

В языке Eiffel были разрешены не только часть противоречий C++, но и противоречия предыдущих языков.

Так, при помощи приема «предварительное действие» были разработаны дополнительные операторы, регулирующие порядок наследования и вызова функций (решение 5.1).

Также в языке Eiffel при использовании приема «предварительное действие» разработан механизм «Проектирование по контракту», который позволяет задавать различные типы условий (контракты), проверяемых во время работы программы. При нарушении одного из пунктов контракта наступает заранее обговоренная и согласованная мера (решение 2.3).

Таким образом, произошла третья итерация ТРИЗ-эволюции (см. рис. 7).

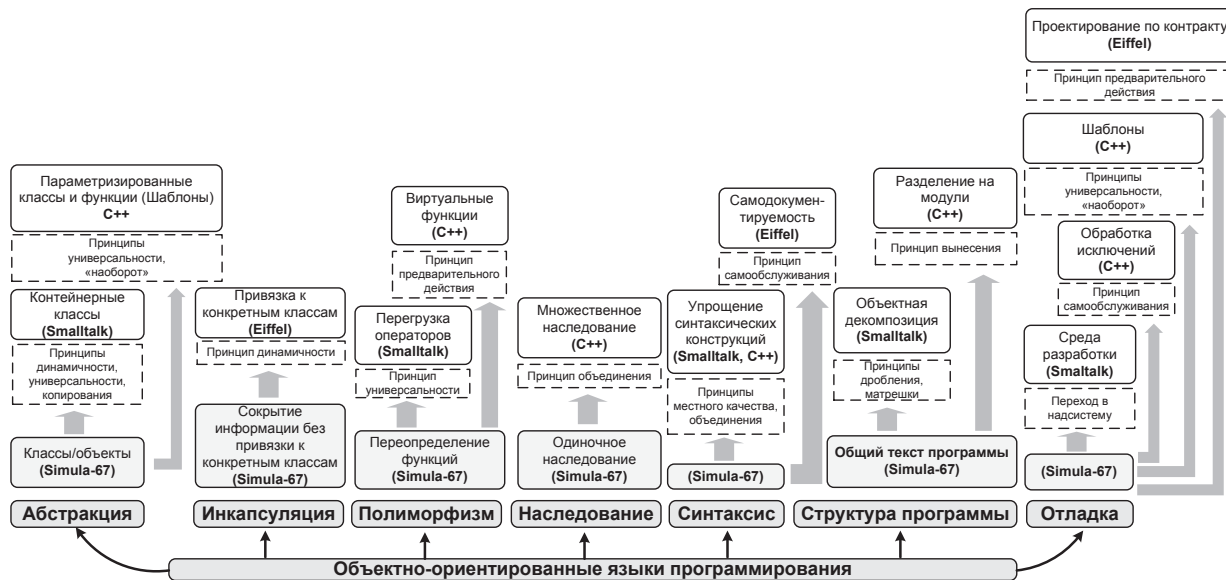


Рис. 7. Третья итерация ТРИЗ-эволюции механизмов ООП

Аналогично были проанализированы следующие популярные объектно-ориентированные языки: Python; Java; Delphi; Perl 6; C#; Scala; PHP; Objective C; Ruby.

Общая ТРИЗ-эволюционная карта механизмов ООП представлена на рис. 8.

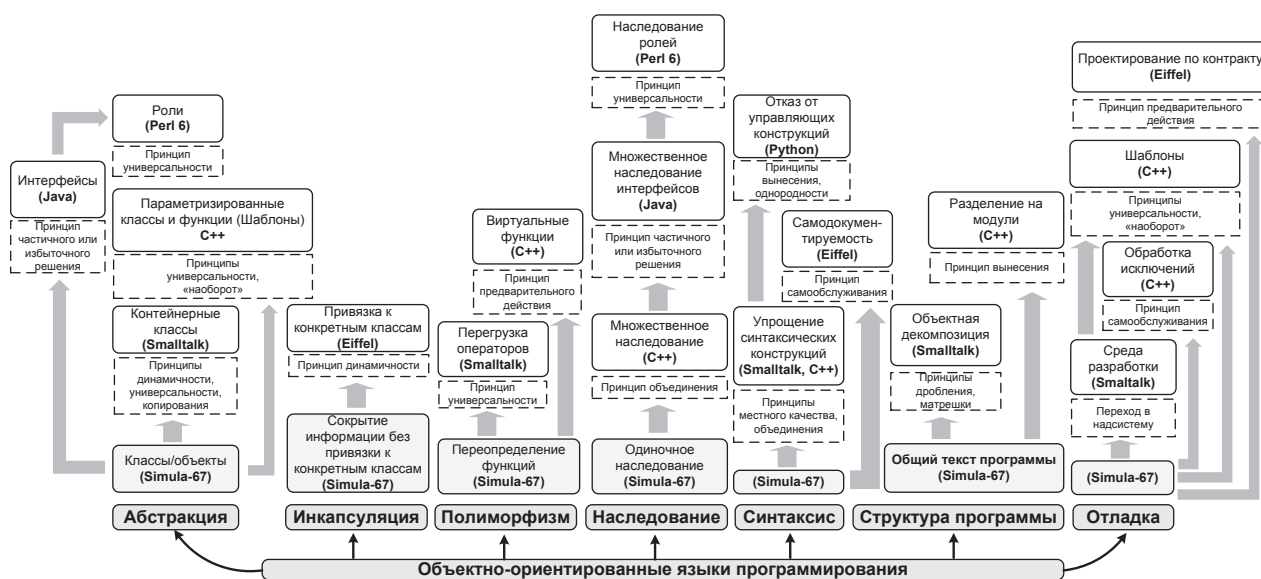


Рис. 8. ТРИЗ-эволюционная карта механизмов ООП

Языки Delphi, C#, Scala, PHP, Objective C, Ruby не отражены на ТРИЗ-эволюционной карте в связи с тем, что противоречия, которые были разрешены в этих языках, не затрагивают объектно-ориентированный подход либо совершенствуют реализацию уже существующих механизмов ООП.

ТРИЗ-эволюционная карта объектно-ориентированных языков программирования

Использование данной карты позволит существенно повысить эффективность обучения за счёт систематизации знаний, в данном случае – знаний о механизмах реализации объектно-ориентированных возможностей в различных языках программирования. Систематизация знаний реализуется следующим образом [9, 15]:

1. Сначала студенты изучают все инструменты ТРИЗ. Если по каким-то причинам они не смогут изучить все инструменты, то тогда изучают только приёмы разрешения противоречий.

2. После этого студенты начинают изучение дисциплины ООП с самого простого набора механизмов (язык реализации выбирается на усмотрение преподавателя). Студентам предлагается решить (запрограммировать) самую простую задачу.

3. Затем увеличивается сложность задачи и снова предлагается студентам её запрограммировать.

4. Далее студенты определяют противоречия и предпринимают попытку разрешить эти противоречия инструментами ТРИЗ. То есть они должны предложить новый механизм ООП или, по крайней мере, определить свойства, которыми должен обладать этот механизм. Таким образом, студенты «открывают» для себя все последующее механизмы ООП.

С учётом критерия оценки степени реализации объектно-ориентированных возможностей была построена S-образная кривая (см. рис. 9), которая наглядно показывает, как изменялась степень реализации объектно-ориентированных возможностей в различных языках программирования. Серым выделены языки, не внёсшие вклад в развитие этих возможностей.

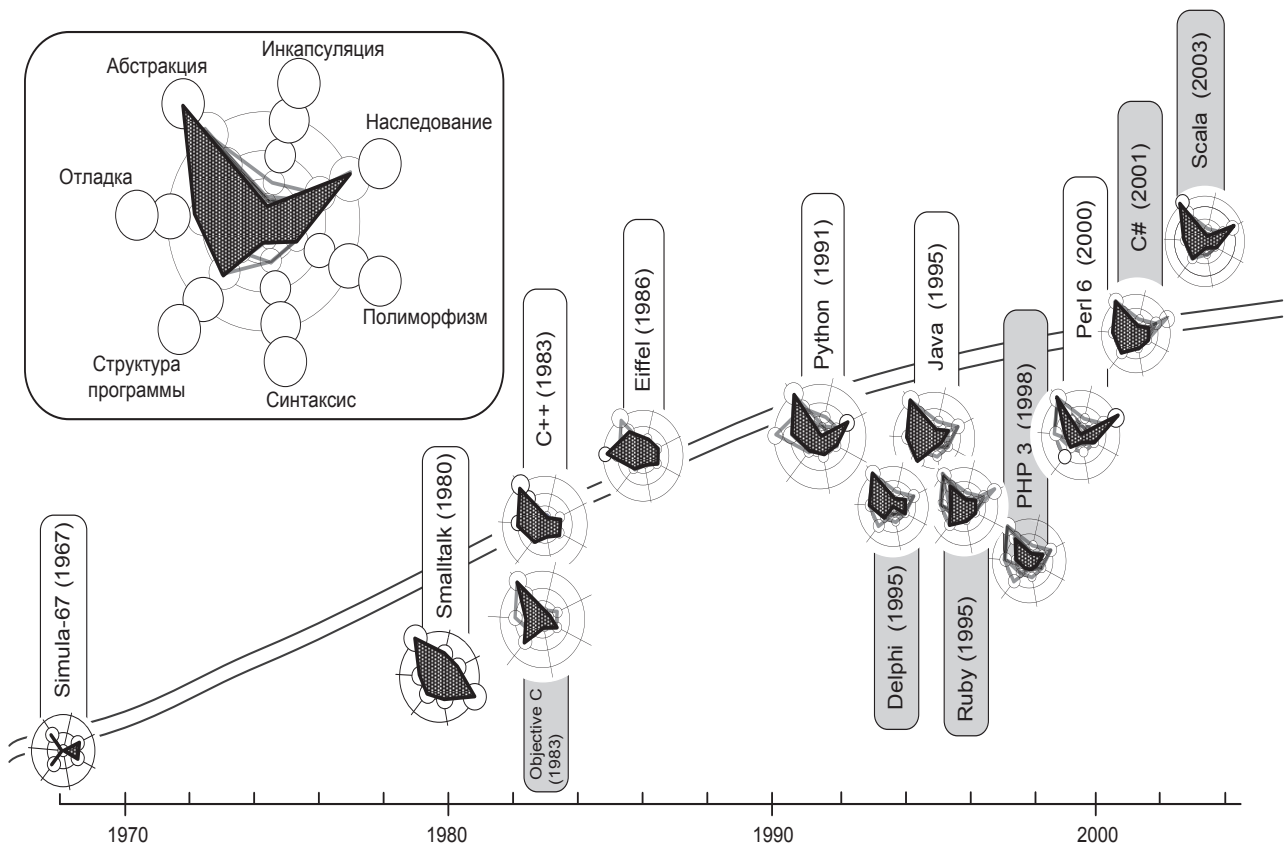


Рис. 9. S-образная кривая для объектно-ориентированных языков программирования

Заключение

Проведённый анализ объектно-ориентированных языков программирования позволил:

- систематизировать знания о существующих механизмах реализации объектно-ориентированных возможностей;
- обосновать эволюцию механизмов ООП;
- выявить противоречия, которые запускают механизм эволюции;
- определить ТРИЗ-инструменты разрешения противоречий, которые стали движущей силой эволюции;
- построить ТРИЗ-эволюционную карту механизмов ООП, которая позволяет существенно интенсифицировать процесс обучения студентов ООП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшуллер, Г. С. Поиск новых идей: от озарения к технологии (теория и практика решения изобретательских задач) / Г. С. Альтшуллер, Б. Л. Злотин, А. В. Зусман. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1989. – 111 с.
2. Бадд, Т. Объектно-ориентированное программирование в действии / Т. Бадд. – СПб.: Питер, 1997. – 464 с.
3. Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на С++ / Г. Буч; пер. с англ. И. Романовский, Ф. Андреев. – М.: Бином, 1998. – 560 с.
4. Дал, У. И. Симула-67: Универсальный язык программирования / У. И. Дал, Б. Мюрхауг, К. Нюгорд; пер. с англ. К. С. Кузьмина, Е. И. Яковлева. – М.: Мир, 1969. – 100 с.
5. Лутц, М. Изучаем Python / М. Лутц; пер. с англ. А. Киселев. – 4-е изд. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 1280 с.
6. Себеста, Р. У. Основные концепции языков программирования / Р. У. Себеста. – 5-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 672 с.
7. Страуструп, Б. Дизайн и эволюция С++ / Б. Страуструп. – СПб.: ДМК Пресс, 2006. – 445 с.
8. Фридман, А. Л. Основы объектно-ориентированной разработки программных систем / А. Л. Фридман. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 97 с.
9. Berdonosov, V. Fractality of knowledge and TRIZ // ScienceDirect, an inter-national Journal. – 2011. – Vol.09. – P. 659-664.
10. Berdonosov V., Redkolis E. TRIZ-fractality of computer-aided software engineering systems // ELSEVIER: ScienceDirect international Journal. – 2011. – Vol. 09. – P. 199-213.
11. Berdonosov V., Redkolis E. TRIZ-Fractality of mathematics // ELSEVIER: ScienceDirect international Journal. – 2011. – Vol. 09. – P. 461-472.
12. Berdonosov V., Sycheva T. TRIZ-evolution of Programming System Proceedings of the ETRIA TRIZ Future Conference, Dublin, 2-4 November 2011, published by Institute of Technology Tallaght.
13. Goldberg, A. Smalltalk: the language and its implementation / A. Goldberg. – Xerox Corporation, 1983. – 720 p.
14. Mandelbrot, Benoit. The Fractal Geometry of Nature, Freeman. New York, 1983.
15. Создание и обеспечение функционирования базовой кафедры вуза на предприятии как один из факторов интенсификации технологических процессов / А. Р. Куделько, Б. Н. Марьин, В. В. Лиманкин, С. Б. Марьин, А. М. Шпилев, В. И. Шпорт, В. Н. Быченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2012. – № IV-1(12). – С. 82-89.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В ЦЕНТРАЛЬНОМ СИЛОВОМ ПОЛЕ

SIMULATION OF A MATERIAL POINT MOTION IN THE CENTRAL FORCE FIELD



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; 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 Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681021, Komsomolsk-on-Amur, 1 – 69, Kotovskogo Str.; 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, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Первостроителей, д. 19, кв. 144; 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); 681021, Komsomolsk-on-Amur, 19 – 144, Pervostroiteley Pr.; 53-79-24. E-mail: egoroff_v@list.ru.

Аннотация. Рассматривается задача о движении материальной точки в центральном силовом поле. Строятся траектории различных видов (круговая, эллиптическая, параболическая, гиперболическая) по заданным начальным условиям. Моделируется процесс полета точки по эллиптической орбите. Исследуются траектории, пересекающие земную поверхность.

Summary. The paper investigates the problem of motion of a material point in the central force field. We build different trajectories (circular, elliptic, parabolic, hyperbolic) subject to the given initial conditions. The elliptic trajectory flight of a material point is simulated. We also analyze trajectories that cross the earth surface.

Ключевые слова: теоретическая механика, центральная сила, материальная точка, уравнение Бинэ, уравнение Кеплера.

Key words: theoretical mechanics, central force, material point, Binet equation, Kepler equation.

УДК 531

Общие положения

Центральной называется сила, линия действия которой проходит через некоторую фиксированную точку пространства (полюс) [3]. Движение материальной точки в поле центральной силы обладает следующими свойствами:

1. Траектория движения точки – плоская кривая. Центр, через который проходит линия действия силы, лежит в плоскости траектории. В полярной системе координат (ρ, φ) с полюсом в центре силового поля для центральной силы имеем выражение

$$\mathbf{F} = F_r \cdot \frac{\mathbf{r}}{r},$$

где F_r – проекция силы на радиус-вектор точки.

2. При движении точки в центральном силовом поле выполняется закон площадей (секторная скорость остается постоянной):

$$1/2 r^2 \dot{\varphi} = c = \text{const}.$$

На основании этих двух свойств и общего уравнения динамики

$$m\mathbf{w} = \mathbf{F},$$

где m – масса точки, w – ее ускорение, можно получить дифференциальное уравнение траектории материальной точки (уравнение Бинэ):

$$\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = -\frac{F_r}{4mc^2 u^2},$$

здесь $u = 1/r$.

Наиболее важным случаем центральной силы является гравитационная сила планеты. Ньютоновская сила притяжения планеты, принимаемой за шар с радиальным распределением плотности, действующая на материальную точку, находящуюся вне пределов шара, равна

$$\mathbf{F} = -f \frac{mM}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (1)$$

где f – гравитационная постоянная; M – масса планеты; r – расстояние от точки до центра планеты. Для случая притяжения к Земле сила (1) примет вид

$$\mathbf{F} = -\frac{mgR^2}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения тела относительно невращающейся Земли; R – радиус Земли.

При подстановке силы (2) в уравнение Бинэ получим дифференциальное уравнение траектории материальной точки, движущейся под действием силы притяжения Земли:

$$\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = \frac{1}{p}, \quad (3)$$

где $p = 4c^2 / (gR^2) = \text{const}$.

Цели и задачи предлагаемой работы

Целью предлагаемой работы является графическая иллюстрация теоретических положений, связанных с движением материальной точки в гравитационном поле Земли, средствами Borland C++ Builder 6.0.

В работе решаются пять задач:

1. Построение траектории точки, начинающей свое движение по орбите в перигее со скоростью не ниже круговой.
2. Построение траектории точки, начинающей свое движение в произвольной точке орбиты со скоростью не ниже круговой.
3. Построение траектории точки, начинающей свое движение по орбите в апогее со скоростью не выше круговой.
4. Моделирование процесса движения точки по эллиптической орбите.
5. Исследование параметров траекторий, пересекающих земную поверхность.



Для разрешения технических вопросов, связанных с программированием, были использованы источники [1; 2; 6].

Далее подробно рассматривается каждая задача.

Задача 1. Построение траектории точки, начинающей свое движение по орбите в перигее со скоростью не ниже круговой

Решение уравнения (3) можно привести к виду

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \psi}, \quad (4)$$

где p и e – постоянные [3]. Кривые (4) представляют собой конические сечения. Тип траектории определяется значением величины e , называемой эксцентриситетом конического сечения:

$e = 0$ – круговая траектория;

$e < 1$ – эллиптическая траектория;

$e = 1$ – параболическая траектория;

$e > 1$ – гиперболическая траектория.

Значение p в уравнении (4) то же самое, что и в уравнении (3). Угол ψ в уравнении (4) отсчитывается от направления на *перигей* – ближайшую к полюсу O точку траектории.

Рассмотрим задачу, в которой точка начинает свое движение по орбите в перигее. Будем считать известными начальное расстояние от точки до полюса r_0 и начальную скорость точки v_0 . Тогда начальные условия примут вид $r = r_0$, $v = v_0$ при $\psi = 0$. По этим данным можно определить эксцентриситет конического сечения e , секторную скорость c и параметр конического сечения p [3]:

$$e = \frac{r_0 v_0^2}{gR^2} - 1; \quad c = 1/2 r_0 v_0; \quad p = \frac{4c^2}{gR^2}. \quad (5)$$

По найденным значениям p и e можно построить коническое сечение (4).

Сформулируем алгоритм решения задачи:

1. Задаем ускорение свободного падения $g = 0,0098 \text{ м/с}^2$ и радиус Земли $R = 6400 \text{ км}$.
2. Запрашиваем у пользователя начальные данные r_0 и v_0 . На величину r_0 существует определенное ограничение. Дело в том, что составленные выше уравнения справедливы при движении точки вне пределов земной атмосферы, но в достаточной близости к ее поверхности [3]. Таким образом, значение r_0 должно быть не меньше суммы радиуса Земли и высоты атмосферы. Расстояние от уровня моря до линии Кармана, разделяющей атмосферу Земли и космос, составляет 100 км . Поэтому значение r_0 должно быть не менее 6500 км (радиус Земли 6400 км + высота атмосферы 100 км) (см. прим. 1).
3. Пользуясь соотношениями (5), находим параметры траектории p и e .
4. Строим оси декартовой ортогональной системы координат и определяем масштаб изображения (количество пикселей на километр), единый по обеим осям.
5. Помещаем на экран изображение Земли так, чтобы центр Земли совпадал с полюсом системы координат. Размер изображения Земли устанавливаем в соответствии с найденным масштабом. Это позволит получить на экране монитора уменьшенную копию реальной картины движения точки в гравитационном поле Земли с сохранением всех пропорций.
6. В соответствии с найденным масштабом строим траекторию движения точки (коническое сечение). Для лучшего представления о размерах траектории на оси координат наносим характерные расстояния в километрах.

На рис. 1 представлены различные виды траекторий, полученных в результате решения задачи, и соответствующие им значения начальных условий. Эллиптическая траектория проиллюстрирована тремя рисунками, с тем чтобы дать наглядное представление о различном масштабировании изображений.

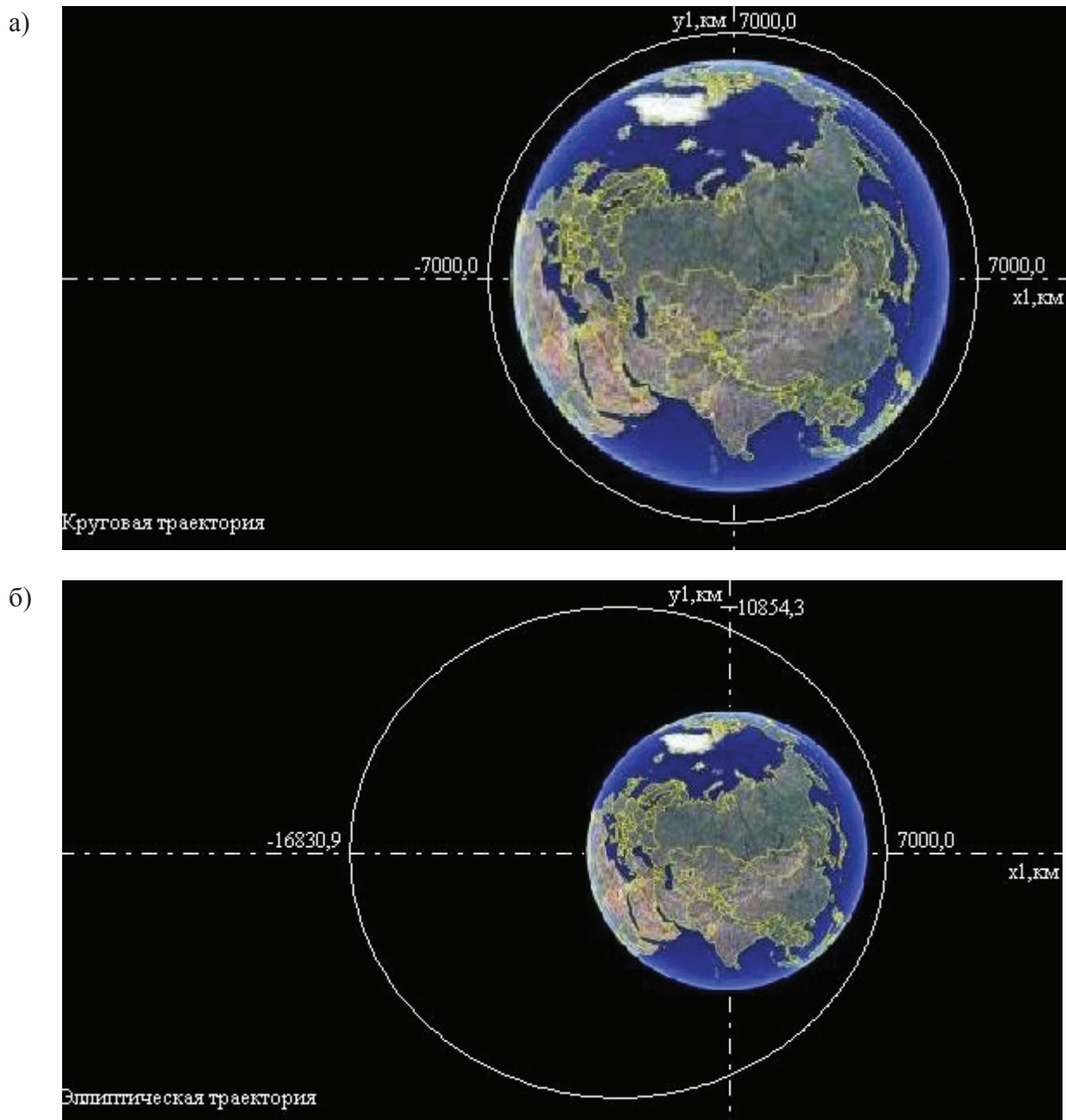
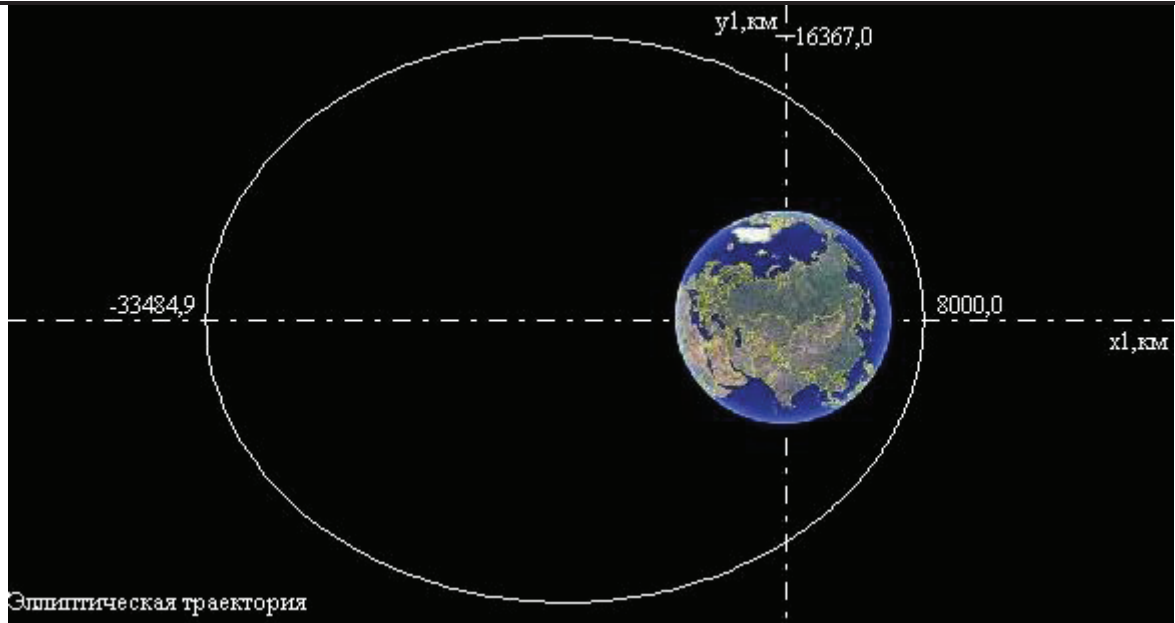


Рис. 1. Траектории движения точки в гравитационном поле Земли (начало):

а – круговая траектория для $r_0 = 7000 \hat{e}_1$, $v_0 = 7,5726 \hat{e}_2 / \dot{n}$;

б – эллиптическая траектория для $r_0 = 7000 \hat{e}_1$, $v_0 = 9 \hat{e}_2 / \dot{n}$

В)



Г)

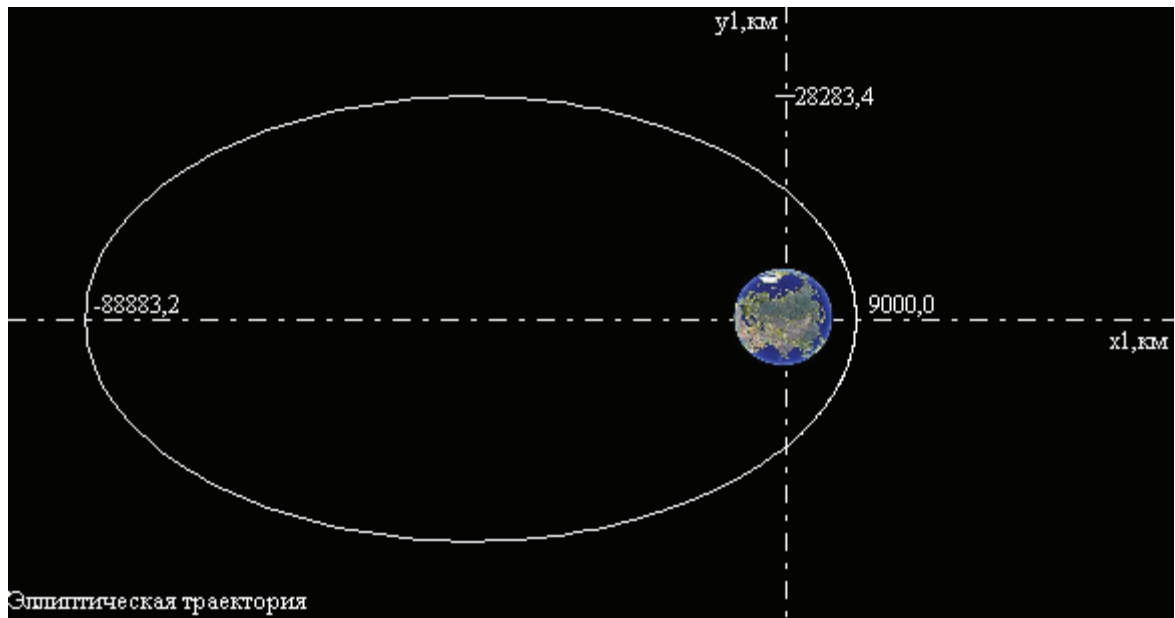


Рис. 1. Траектории движения точки в гравитационном поле Земли (продолжение):

в – эллиптическая траектория для $r_0 = 8000 \text{ км}$, $v_0 = 9 \text{ км/с}$;

г – эллиптическая траектория для $r_0 = 9000 \text{ км}$, $v_0 = 9 \text{ км/с}$;

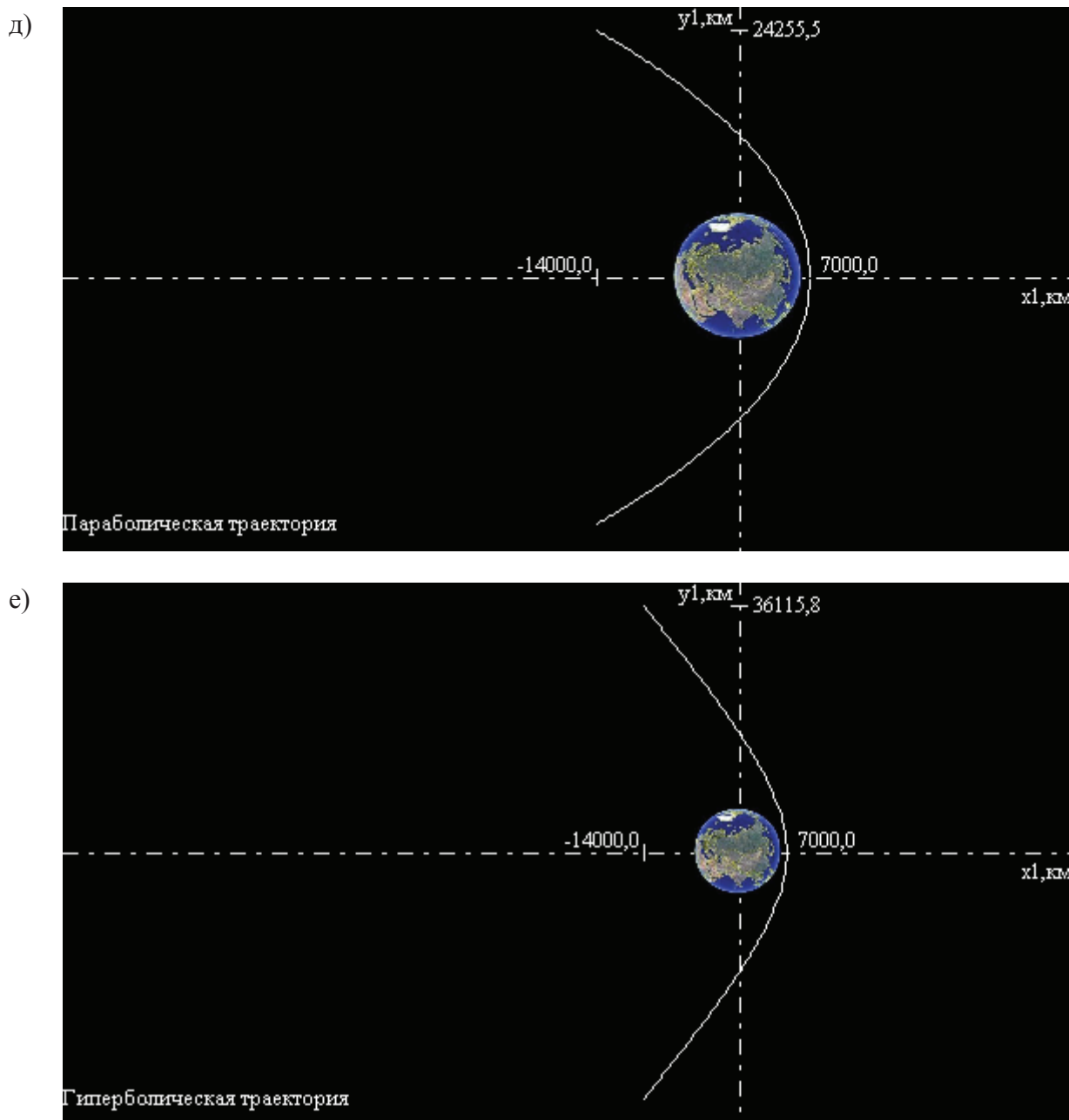


Рис. 1. Траектории движения точки в гравитационном поле Земли (окончание):

д – параболическая траектория для $r_0 = 7000 \text{ êì } , v_0 = 10,71 \text{ êì /ñ } ;$

е – гиперболическая траектория для $r_0 = 7000 \text{ êì } , v_0 = 12 \text{ êì /ñ }$

Задача 2. Построение траектории точки, начинающей свое движение в произвольной точке орбиты со скоростью не ниже круговой

Пусть в начальный момент времени материальная точка находится в произвольной точке A_0 орбиты. Начальные условия в этом случае представлены расстоянием от точки до центра Земли r_0 , скоростью точки v_0 и углом наклона θ_0 вектора скорости к местному горизонту (плоскости, перпендикулярной к радиусу-вектору точки A_0) (см. рис. 2).

Рассмотрим ход решения задачи. По заданным начальным условиям можно сразу найти секторную скорость s и параметр траектории p [3]:

$$c = 1/2 r_0 v_0 \cos \theta_0; \quad (6)$$

$$p = \frac{4c^2}{gR^2} = \frac{r_0^2 v_0^2 \cos^2 \theta_0}{gR^2} = r_0 \left(\frac{v_0}{v_1} \right)^2 \cos^2 \theta_0 = r_0 v \cos^2 \theta_0, \quad (7)$$

где $v_1 = \sqrt{gR^2/r_0}$ – круговая скорость в точке A_0 , $v = \frac{v_0}{v_1} \cos \theta_0$.

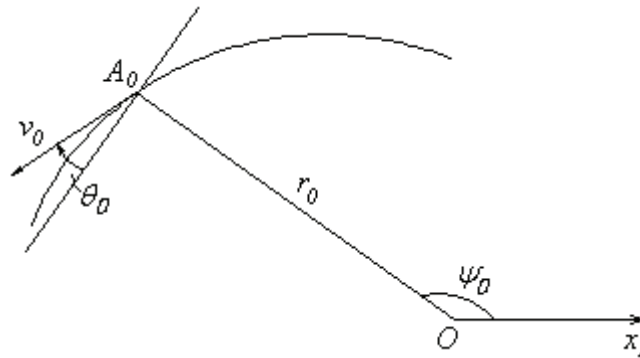


Рис. 2. Начальные условия для построения траектории точки в задаче 2

Далее из (7) выражаем v :

$$v = \frac{p}{r_0 \cos^2 \theta_0}. \quad (8)$$

Затем после некоторых преобразований получаем выражения для эксцентриситета орбиты e и начального полярного угла ψ_0 точки, отсчитываемого от направления на перигей [3]:

$$e = \sqrt{1 - v \cos^2 \theta_0}; \quad (9)$$

$$\psi_0 = \arccos \left[\left(\frac{p}{r_0} - 1 \right) \frac{1}{e} \right]. \quad (10)$$

Полученные соотношения позволяют нам построить траекторию и указать начальное положение точки на ней.

Сформулируем алгоритм решения задачи:

1. Задаем ускорение свободного падения $g = 0,0098 \text{ м/с}^2$ и радиус Земли $R = 6400 \text{ км}$.
2. Запрашиваем у пользователя начальные данные r_0 , v_0 и θ_0 . Ограничение на величину r_0 то же, что и в задаче 1.
3. Пользуясь соотношениями (6) – (10), находим параметры траектории p и e , а также начальный полярный угол ψ_0 материальной точки.
4. Строим траекторию и кружком изображаем на ней материальную точку в ее начальном положении A_0 .

Замечания к задаче 2:

1. При построении эллиптической траектории очень трудно наугад подобрать входные параметры r_0 , v_0 и θ_0 так, чтобы после выполнения расчетов по формулам (6)-(10) выполнялись следующие три условия:

- а) $e < 1$, что является необходимым условием эллиптической траектории;

б) расстояние от полюса O до перигея рассчитанной орбиты не меньше 6500 êi (это ограничение пояснено в задаче 1);

в) угол ψ_0 таков, что точка A_0 попадает в нужный нам квадрант ортогональной декартовой системы координат. Это очень важно, если мы хотим протестировать программу для начальных положений точки A_0 , расположенных во всех четырех квадрантах координатной системы.

Для решения этой проблемы и корректного подбора исходных значений создана специальная процедура, осуществляющая автоматический поиск возможных наборов значений r_0 , v_0 и θ_0 с тем, чтобы все вышеперечисленные условия выполнялись.

2. Если задать в качестве начальных условий некоторое значение r_0 , $\theta_0 = 0$ и $v_0 = v_1 = \sqrt{gR^2/r_0}$, то траектория движения точки будет круговой. При этом заданных начальных условий недостаточно, чтобы однозначно определить начальное положение точки на орбите. В этом случае точка может находиться в начальный момент времени в любом месте траектории.

На рис. 3 представлены различные виды траекторий, полученных в результате решения задачи, и показано начальное положение точки в каждом случае.

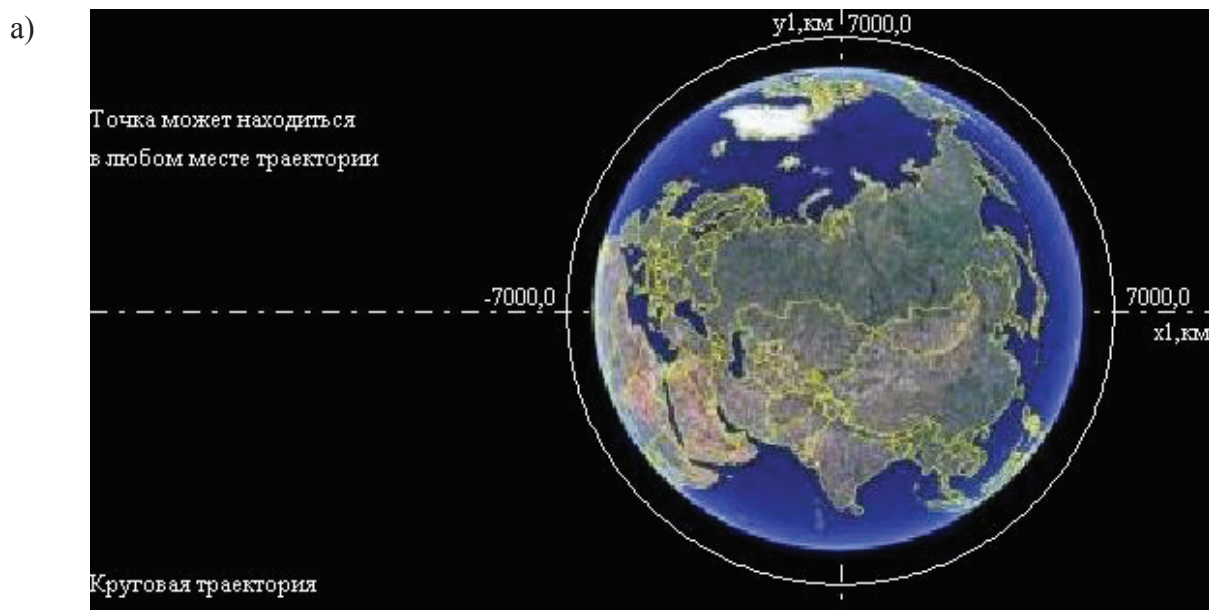
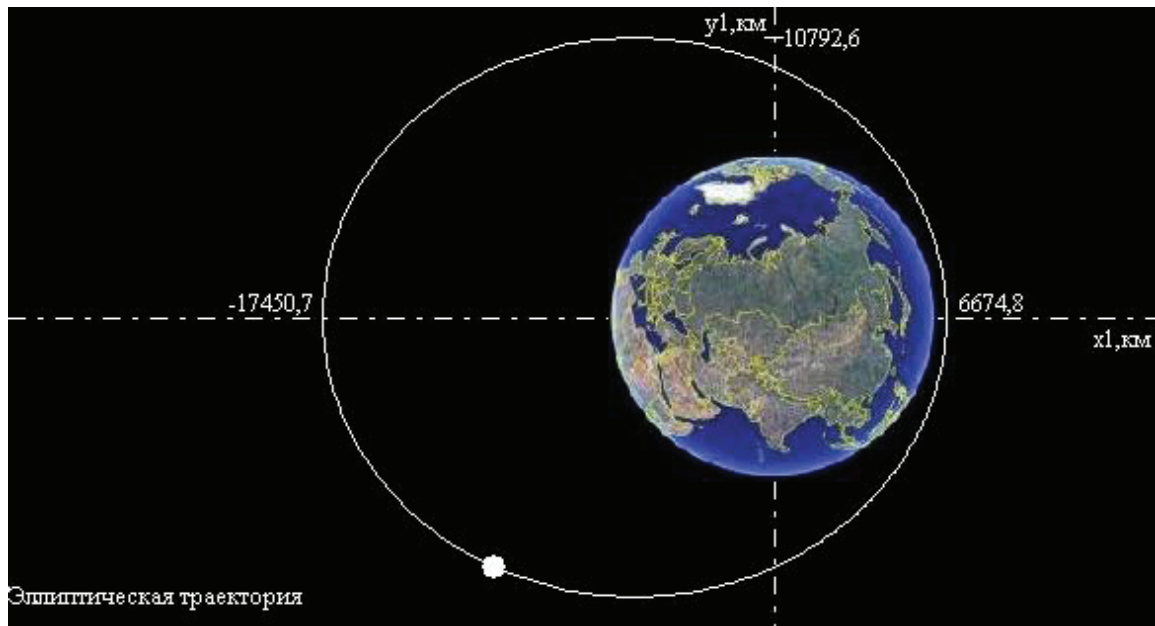


Рис. 3. Траектории движения точки в гравитационном поле Земли (начало):

а – круговая траектория для $r_0 = 7000 \text{ êi}$, $v_0 = 7,5726 \text{ êi} / \text{ñ}$, $\theta_0 = 0^\circ$

б)



в)

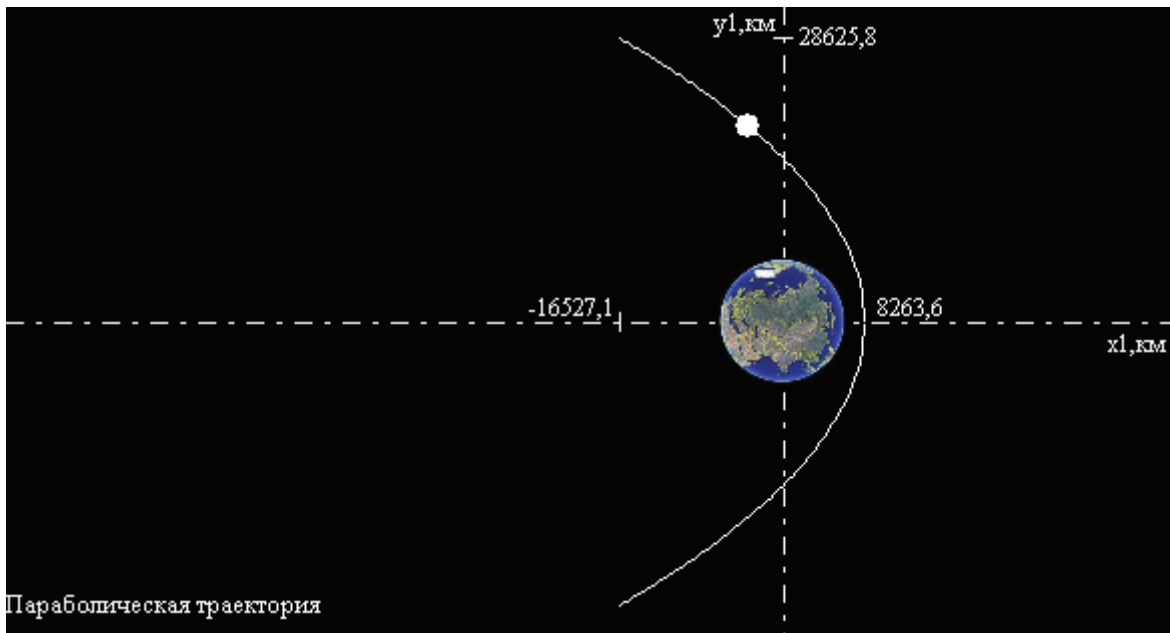


Рис. 3. Траектории движения точки в гравитационном поле Земли (продолжение):

б – эллиптическая траектория для $r_0 = 14\,500 \text{ êì}$, $v_0 = 4,7 \text{ êì / ñ}$, $\theta_0 = -24^\circ$;

в – параболическая траектория для $r_0 = 20\,000 \text{ êì}$, $v_0 = 6,3357 \text{ êì / ñ}$, $\theta_0 = 50^\circ$

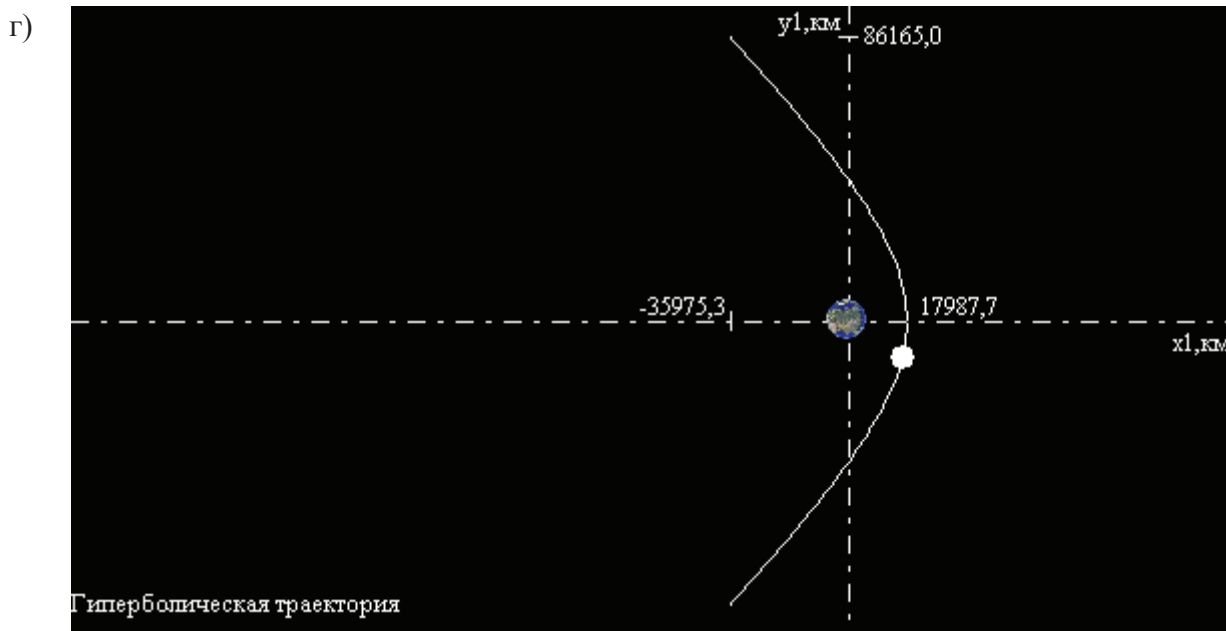


Рис. 3. Траектории движения точки в гравитационном поле Земли (окончание):
 г – гиперболическая траектория для $r_0 = 20\,000 \text{ км}$, $v_0 = 7 \text{ км/с}$, $\theta_0 = -20^\circ$

Задача 3. Построение траектории точки, начинающей свое движение по орбите в апогее со скоростью не выше круговой

В этой задаче ограничимся рассмотрением только эллиптических траекторий. Если траектория не пересекает поверхность Земли, то она может быть траекторией искусственного спутника Земли.

Для того чтобы траектория точки не пересекала поверхность Земли, начальная скорость точки v_0 должна удовлетворять условию [3]

$$v_0 > v_k,$$

где $v_k = v_1 \sqrt{\frac{2Rh}{R+h} \cos^2 \theta_0 - R^2}$, здесь $h = r_0 - R$ – высота точки над поверхностью Земли в начальный момент времени.

Рассмотрим для простоты случай $\theta_0 = 0$. При этом если $v = v_0/v_1 > 1$, то $\psi_0 = 0$ [3], т.е. точка начинает свое движение в перигее с начальной скоростью, большей круговой скорости v_1 . Этот случай был рассмотрен в задаче 1. Если же $v < 1$, то $\psi_0 = \pi$, т.е. точка начинает свое движение в *апогее* – самой удаленной от полюса O точке траектории. При этом начальная скорость точки меньше круговой скорости v_1 , но больше скорости v_k , т.е. $v_k < v_0 < v_1$. В этом случае получаются эллиптические траектории, аналогичные построенным в задаче 1.

Большая полуось a эллиптической траектории и период обращения T точки по орбите определяются соотношениями

$$a = \frac{r_0}{2 - v}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{gR^2}}.$$

Рассмотрим только тот случай, когда $\theta_0 = 0$, $v < 1$, $v_0 = v_k$, т.е. точка, начиная свое движение из апогея, коснется земной поверхности в перигее.

Сформулируем алгоритм решения задачи:

1. Задаем ускорение свободного падения $g = 0,0098 \text{ м/с}^2$ и радиус Земли $R = 6400 \text{ км}$.
2. Запрашиваем у пользователя начальные данные r_0 и v_0 . Ограничение на величину r_0 то же, что и в задаче 1.
3. Вычисляем начальную высоту точки над Землей h , скорости v_1 и v_k , а также величину v . Для того чтобы точка коснулась земной поверхности в перигее, надо вводить $v_0 = v_k$.
4. Определяем параметры траектории $e = 1 - v$ и $p = r_0 v$.
5. Строим траекторию.
6. Вычисляем большую полуось a эллиптической траектории и период T обращения точки по орбите.

На рис. 4 представлена эллиптическая траектория точки, касающаяся поверхности Земли в перигее, и указан период обращения точки по орбите.

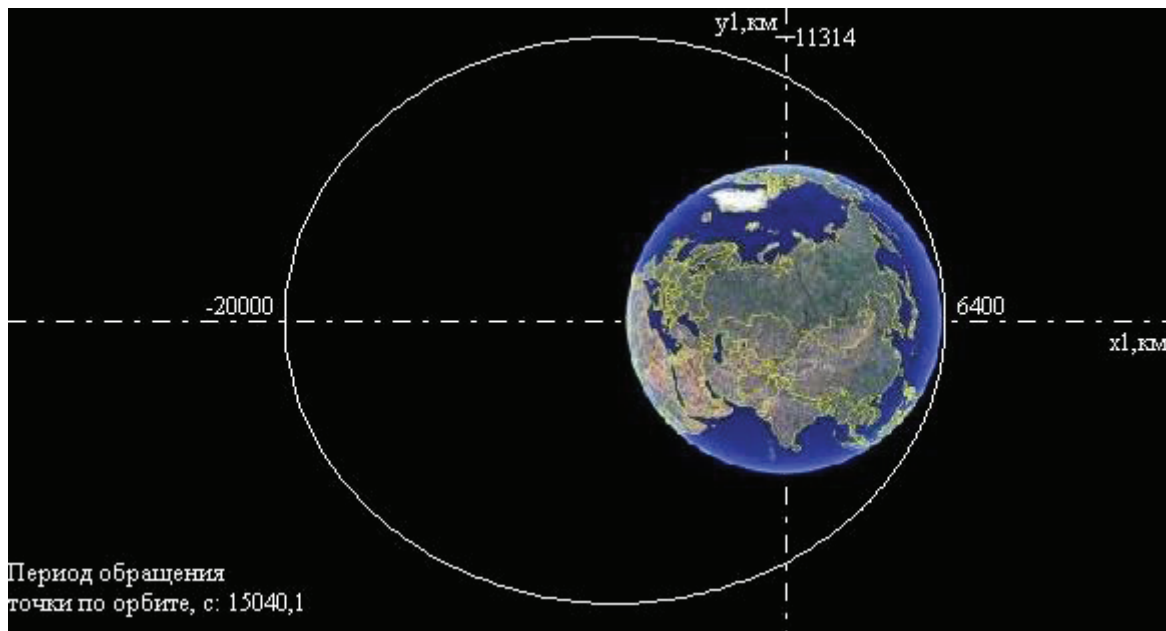


Рис. 4. Эллиптическая траектория точки, касающаяся поверхности Земли в перигее, для $r_0 = -20\,000 \text{ км}$, $v_0 = 3,1195 \text{ м/с}$ и период обращения точки по орбите

Задача 4. Моделирование процесса движения точки по эллиптической орбите

Центральной и наиболее зрелищной частью предлагаемой работы является графическая модель процесса движения точки по эллиптической орбите, реализуемая в задаче 4. Для построения этой модели необходимо уметь определять положение точки на орбите в любой момент времени [5]. Рассмотрим кратко необходимую теорию.

Пусть движение точки происходит по эллипсу с полуосями a и b (см. рис. 5). Опишем из центра эллипса окружность радиусом a . Через точку A на эллипсе проведем линию, перпендикулярную оси x_1 . Пусть точка пересечения этого перпендикуляра с окружностью будет A_1 . Угол E между отрезком O_1A_1 и осью x_1 называется *эксцентрической аномалией*. Угол ψ в исходной полярной системе координат с полюсом O называется *истинной аномалией*.

Связь между эксцентрической и истинной аномалиями выражается зависимостью [3]

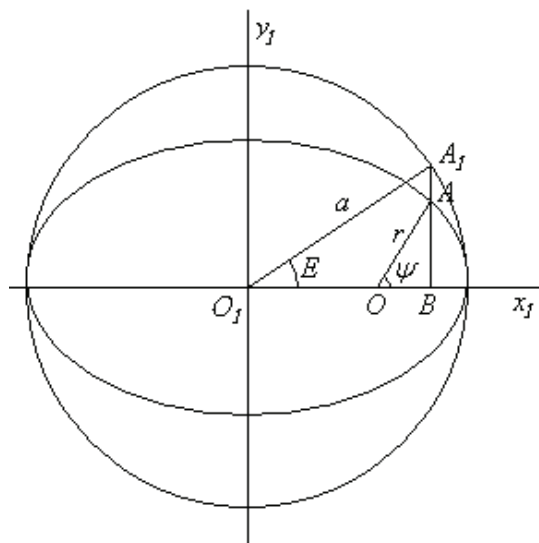


Рис. 5. Эксцентрическая и истинная аномалии

$$\cos \psi = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}. \quad (11)$$

Выражение радиуса-вектора r точки через эксцентрическую аномалию дается равенством

$$r = a(1 - e \cos E). \quad (12)$$

Эксцентрическая аномалия E в момент времени t определяется решением уравнения Кеплера:

$$E - e \sin E = n(t - t_0),$$

где $n = \sqrt{gR^2/a^3}$; t_0 – время начала движения точки по орбите.

Скорость точки v , ее радиальная и поперечная составляющие v_r и v_p определяются следующим образом:

$$v = an \sqrt{\frac{1 + e \cos E}{1 - e \cos E}}; \quad v_p = \frac{a^2 n \sqrt{1 - e^2}}{r}; \quad v_r = \sqrt{v^2 - v_p^2}.$$

Ускорение точки дается равенством

$$w = w_r = \frac{gR^2}{r^2}.$$

Сформулируем алгоритм решения задачи:

1. Задаем ускорение свободного падения $g = 0,0098 \text{ м/с}^2$ и радиус Земли $R = 6400 \text{ км}$.
2. Запрашиваем у пользователя значения большой полуоси орбиты a и эксцентриситета орбиты e . Значение e должно быть таким, чтобы получилась эллиптическая траектория, т.е. $e < 1$.
3. Определяем параметр орбиты p [3]: $p = a(1 - e^2)$.
4. Строим орбиту.
5. Определяем величину n для уравнения Кеплера и период T обращения точки по орбите, как описано в задаче 3.
6. Определяем шаг по времени между последовательными положениями точки на орбите. Для этого делим период T на 80 – 100 частей, чтобы при полном обращении по орбите точка занимала 80-100 последовательных положений. Как показывает практика, именно такое количество шагов дает наилучшее представление о движении точки. В приводимом ниже тестовом примере период разбит на 80 частей и время между последовательными положениями точки составляет 200 с.
7. Запускаем таймер, срабатывающий через каждые 0,5 с. В процедуре обработки прерывания таймера организуем расчет очередного положения точки и ее перемещение на один шаг. Действия, реализуемые процедурой обработки прерывания таймера, следующие:
 - а) В начальный момент времени точка помещается в перигей. Принимается $t_0 = 0$.
 - б) В момент времени, отличный от начального, решается уравнение Кеплера методом последовательных приближений [4; 6]. Это дает нам значение эксцентрической аномалии E для данного момента времени.

в) По соотношениям (11) и (12) находятся значения ψ и r для точки в данный момент времени.

г) Определяются декартовы ортогональные координаты точки x_1 и y_1 по полярным координатам r и ψ .

д) Стирается точка в предыдущем положении и прорисовывается в новом положении. Срабатывание таймера через каждые 0,5 с дает не очень быстрое, но и не очень медленное движение точки.

На рис. 6 представлен мгновенный снимок процесса движения точки по эллиптической траектории.

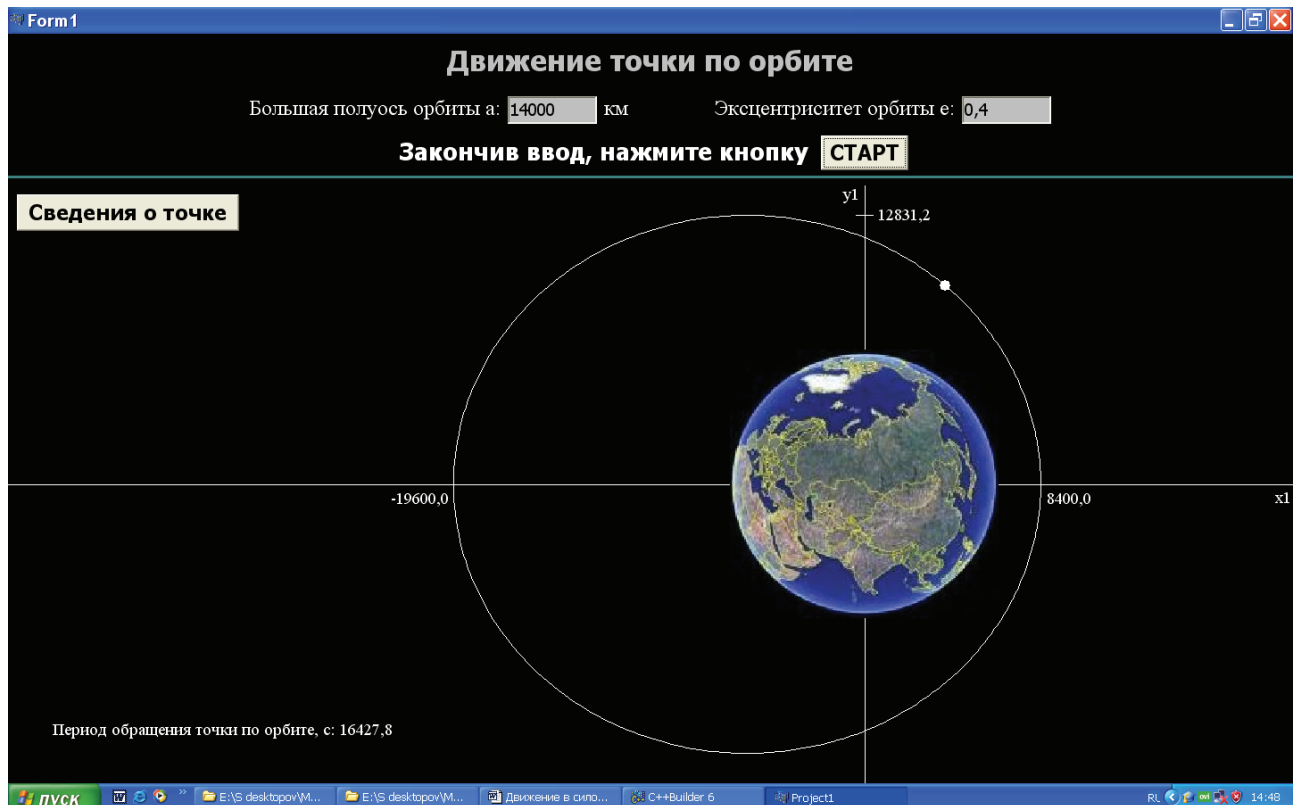


Рис. 6. Мгновенный снимок процесса движения точки по эллиптической траектории для $a = 14000$ и $e = 0,4$

Для лучшего представления о скоростях точки на разных участках траектории можно показать все положения, занимаемые точкой в течение одного оборота по орбите (см. рис. 7). Как видно из рисунка, скорость точки в районе перигея максимальна, а в районе апогея – минимальна, что является следствием постоянства секторной скорости.

В задаче 4 реализован еще один, второй, режим работы под названием «Сведения о точке» (см. рис. 7, кнопку на экране). При выборе этого режима пользователю предлагается указать мышью точку на траектории. После того как точка указана, для нее выводятся все возможные сведения (см. рис. 8).

Задача 5. Исследование параметров траекторий, пересекающих земную поверхность

В этой задаче рассматриваются только те эллиптические траектории, которые пересекают земную поверхность.

Задача 5 состоит из двух подзадач. В первой подзадаче дается ответ на вопрос, пересечет ли траектория земную поверхность, если известны начальная высота точки над

поверхностью Земли h , начальная скорость точки v_0 и угол наклона вектора начальной скорости к местному горизонту θ_0 .

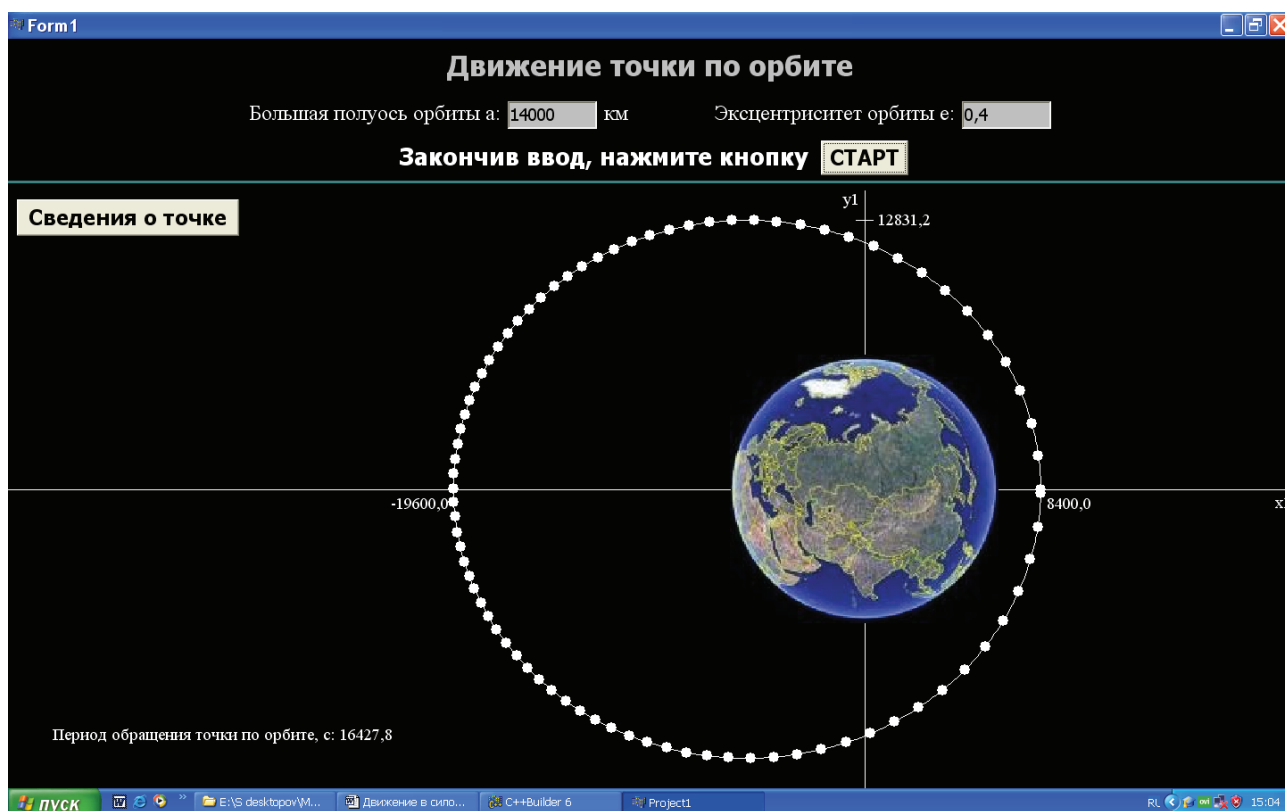


Рис. 7. Положения, занимаемые точкой в течение одного оборота по орбите

Траектория точки пересечет земную поверхность в следующих двух случаях [3]:

1. если $\theta_0 > \theta_0^*$, где $\theta_0^* = \arccos \frac{R}{R+h}$, и v_0 – любое;
2. если $\theta_0 < \theta_0^*$, но $v_0 < v_1 \sqrt{\frac{2Rh}{(R+h) \cos^2 \theta_0 - R^2}}$.

Если же $\theta_0 < \theta_0^*$ и $v_0 > v_1 \sqrt{\frac{2Rh}{(R+h) \cos^2 \theta_0 - R^2}}$, то траектория точки не пересечет земную поверхность.

Сформулируем алгоритм первой подзадачи:

1. Задаем ускорение свободного падения $g = 0,0098 \text{ м/с}^2$ и радиус Земли $R = 6400 \text{ км}$.
2. Запрашиваем у пользователя значения h , v_0 и θ_0 .
3. Определяем θ_0^* и v_1 .

4. На основании вышеприведенных соотношений делаем вывод о том, пересечет ли траектория точки земную поверхность, и выводим ответ пользователю.

На рис. 9 приведен результат работы первой подзадачи.

Движение точки по орбите

Большая полуось орбиты a : км

Эксцентриситет орбиты e :

Закончив ввод, нажмите кнопку

Сведения о точке

Выберите мышью точку на траектории:

Полярный угол, градусов: 166,3

Радиус-вектор, км: 19235,3

Координата x_1 , км: -18682,9

Координата y_1 , км: 4553,7

Полная скорость, км/с: 3,6145

Радиальная скорость, км/с: 0,5534

Поперечная скорость, км/с: 3,5719

Ускорение, км/(с²): 0,0011

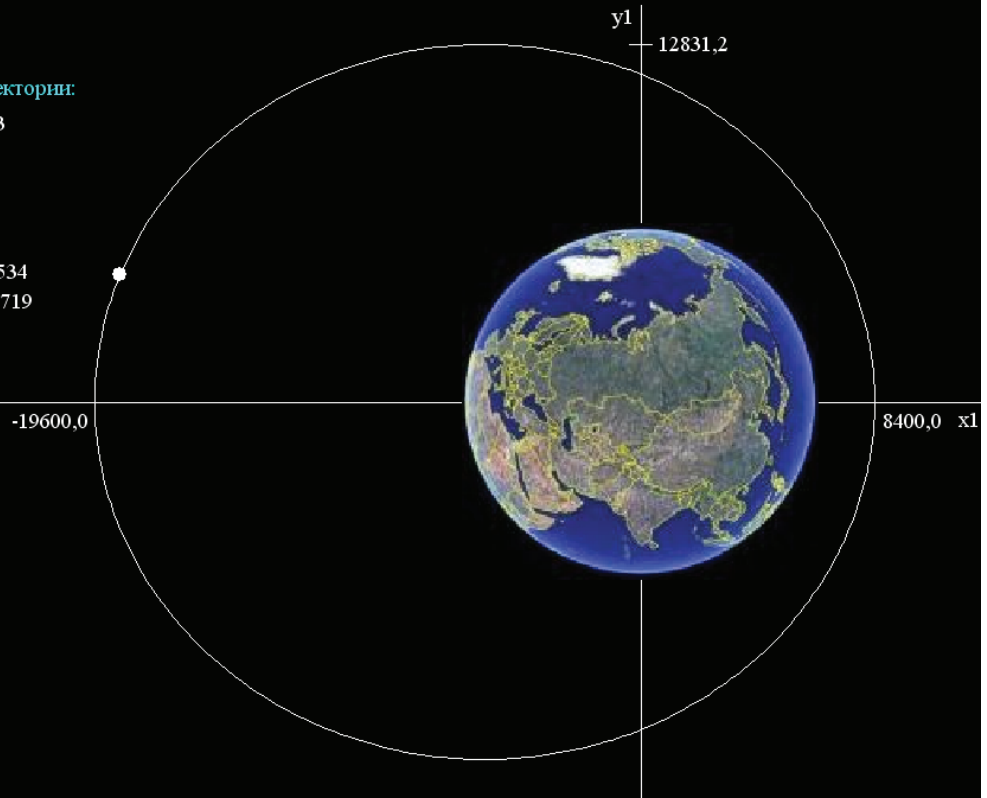


Рис. 8. Режим «Сведения о точке»

Рассмотрим краткую теорию для второй подзадачи задачи 5.

Пусть ψ_1 – угол между начальным радиусом-вектором точки и направлением из полюса O на апогей. В практических целях представляет интерес зависимость $\psi_1 = \psi_1(\theta_0)$ при фиксированном $v = (v_0/v_1)^2$. Эта зависимость определяется соотношением [3]

$$\psi_1 = \arccos\left(\frac{1 - v \cos^2 \theta_0}{\sqrt{1 - v(1 - v) \cos^2 \theta_0}}\right). \quad (13)$$

Во второй подзадаче строятся графики зависимости $\psi_1 = \psi_1(\theta_0)$ для различных v .

Сформулируем алгоритм второй подзадачи:

1. Задаем значение v .
2. Меняя θ_0 в диапазоне от 0 до 90° , находим по (13) ψ_1 для каждого θ_0 и строим график.

3. Меняем значение v и возвращаемся к п. 2. Значение v прогоняем в диапазоне от $2,00$ до $0,25$ с шагом $-0,25$.

Результаты работы второй подзадачи задачи 5 приведены на рис. 10.

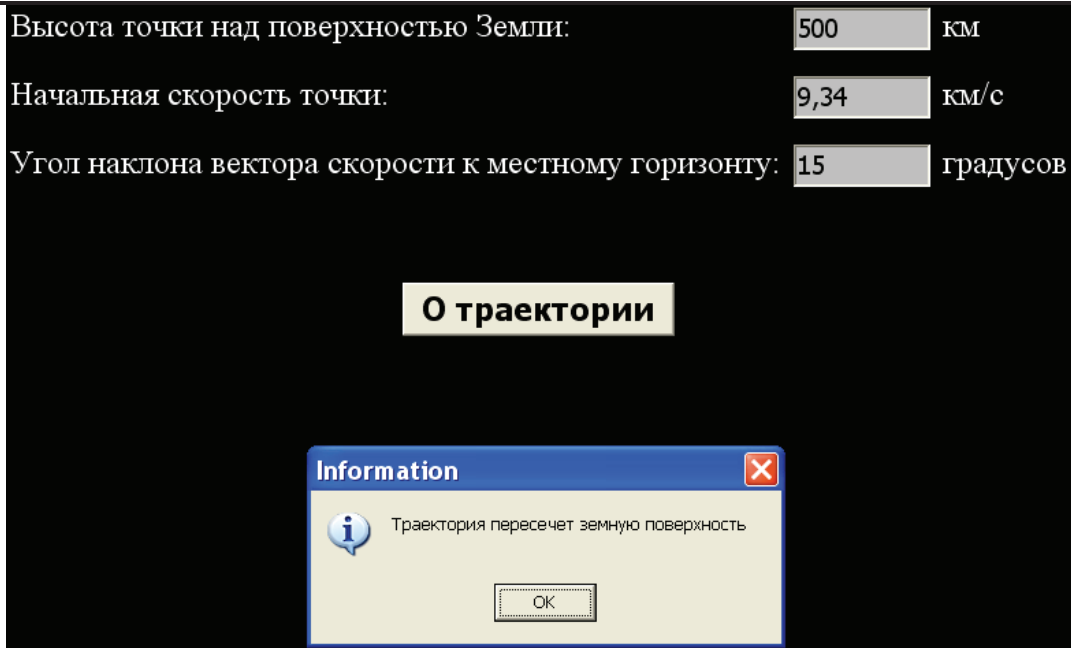


Рис. 9. Результат работы первой подзадачи задачи 5

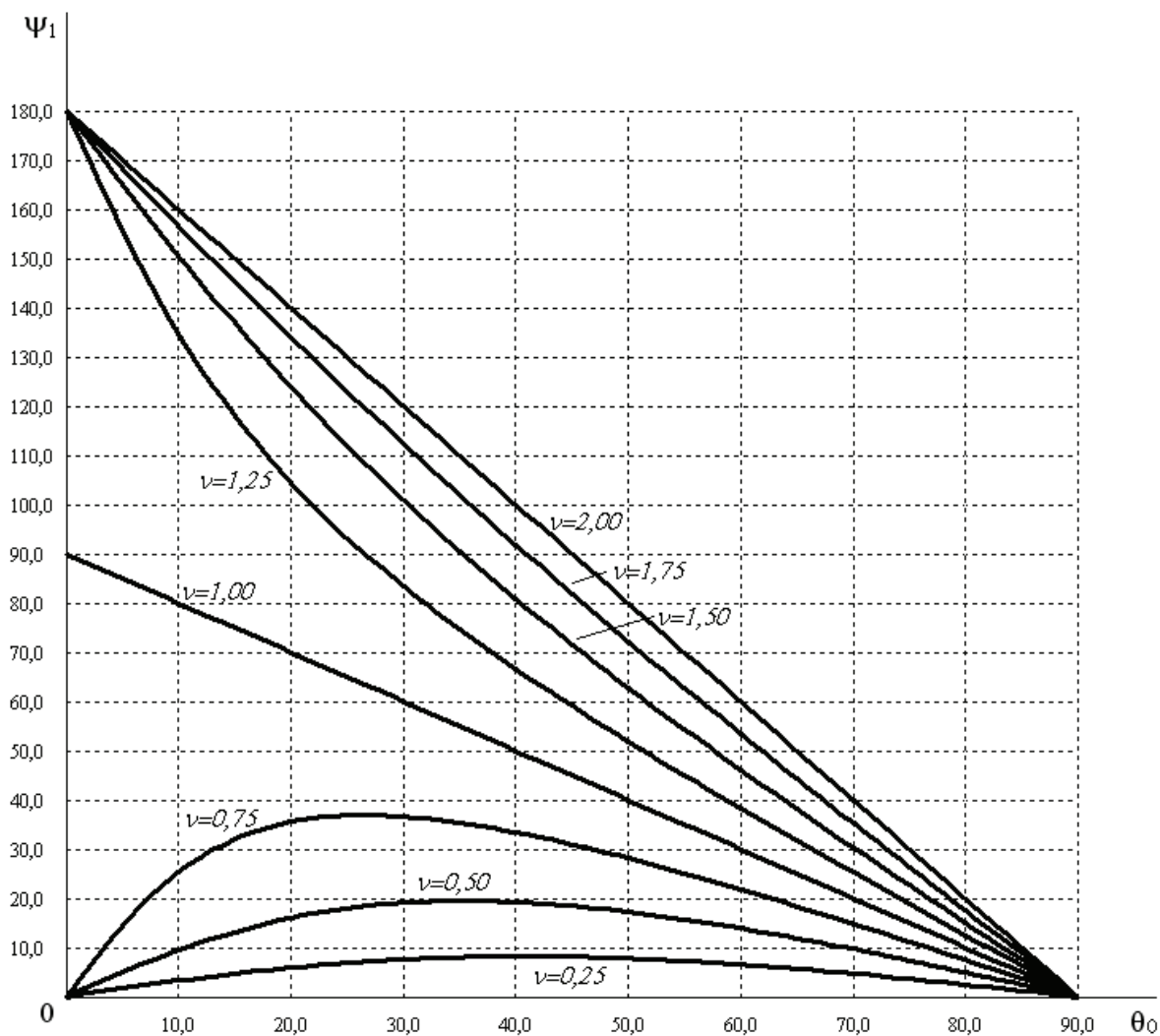


Рис. 10. Графики зависимости $\Psi_1 = \Psi_1(\theta_0)$ для различных ν



Краткие выводы

Таким образом, в работе рассмотрен ряд вопросов, связанных с движением материальной точки в гравитационном поле Земли. Результаты данной работы будут полезны тем, кто хочет получить более детальное и наглядное представление о движении точки в центральном силовом поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский, А. Я. Программирование в C++ Builder 6 и 2006 / А. Я. Архангельский, М. А. Тагин. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 1184 с.
2. Бобровский, С. И. Самоучитель программирования на языке C++ в системе Borland C++ Builder 5.0 / С. И. Бобровский. – М.: ДЕСС КОМ, 2001. – 272 с.
3. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2. Динамика: учеб. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1985. – 496 с.
4. Дубошин, Г. Н. Небесная механика. Основные задачи и методы / Г. Н. Дубошин. – М.: Наука, 1975. – 800 с.
5. Комаровский, Ю. А. Повышение точности определения координат доплеровскими спутниковыми навигационными системами / Ю. А. Комаровский // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I – 1(1). – С. 40-43.
6. Культин, Н. Б. C++ Builder в задачах и примерах / Н. Б. Культин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 336 с.
7. Субботин, М. Ф. Введение в теоретическую астрономию / М. Ф. Субботин. – М.: Наука, 1968. – 800 с.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Genon. Социальная база знаний. Какова высота земной атмосферы? Режим доступа: <http://www.genon.ru>.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Мокрицкий Б. Я., Панова Е. А., Козлова М. А., Саблин П. А.
Boris Y. Mokritsky, Ekaterina A. Panova, Maria A. Kozlova, Pavel A. Sablin

**К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА: ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ON THE PROBLEM OF CONTROLLING THE PERFORMANCE OF METAL CUTTING
TOOLS: OPTIMIZING THE PROPERTIES OF TOOL MATERIALS**



Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskij – Doctor of Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Av. E-mail: boris@knastu.ru.



Панова Екатерина Андреевна – магистр направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tm@knastu.ru.

Ms. Ekaterina. A. Panova – Master of «Design Engineering Support for Machinery Production», Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tm@knastu.ru.



Козлова Мария Андреевна – магистр направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tm@knastu.ru.

Ms. Maria. A. Kozlova – Master of «Design Engineering Support for Machinery Production», Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tm@knastu.ru.



Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ikpmt@knastu.ru.

Mr. Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ikpmt@knastu.ru.



Аннотация. Проблема обеспечения работоспособности металлорежущего инструмента не решена исследователями до сих пор. Для условий современного автоматизированного механообрабатывающего производства, для обеспечения высокой точности обработки проблема дополняется требованием стабильной работоспособности инструмента. Исследователями решение проблемы ведется по различным направлениям. В статье предпринята попытка решения проблемы обеспечения работоспособности металлорежущего инструмента за счет улучшения свойств инструментального материала.

Summary. The problem of ensuring optimal performance of metal cutting tools has not been solved until now. In the context of modern automated machining plants which requires high precision machining, the problem is further aggravated by the requirement of stable operation of the instrument. Our colleagues have been trying to solve the problem by different ways. In this paper we make an attempt to address the problem of ensuring optimal performance of cutting tools by improving the properties of tool materials.

Ключевые слова: работоспособность инструмента, инструментальный материал.

Key words: tool performance, tool materials.

УДК 621.9

Повышение производительности, точности и эффективности металлообработки сдерживается низкой прочностью и износостойкостью металлорежущего инструмента. Так, более 50 % отказов технологических систем резания связано с утратой работоспособности инструмента, причем более 20 % вызвано поломкой инструмента. Это показывает, что проблема обеспечения (повышения) работоспособности металлорежущего инструмента не решена. Более того, для условий современного автоматизированного механообрабатывающего производства и необходимости выхода машиностроения на высокую точность (наноточность) обработки проблема дополняется требованием стабильной работоспособности инструмента.

Решение проблемы ведется исследователями по различным направлениям. Наиболее значительные успехи и современные объяснения механизмов разрушения и изнашивания инструмента получены с применением структурно-энергетического подхода к прочности, позволяющего с фундаментальных позиций термодинамики и за счет привлечения дислокационных представлений описать механизмы разрушения инструментального материала и выявить рациональные пути повышения работоспособности за счет улучшения свойств инструментального материала [1; 2; 4; 9].

В статье предпринята попытка развития данного подхода, основанного на том, что инструмент является составной частью технологической системы резания (см. рис. 1) и, следовательно, его работоспособность может определяться не только свойствами инструментального материала, но и процессами в других объектах технологической системы резания [7]. Для упрощения задачи рассмотрим лишь процесс стружкообразования и изменение состояния (устойчивости) упругой системы станка. Выбор этих процессов связан с тем, что в условиях циклического нагружения инструмента (прерывистого или нестационарного резания) они чрезвычайно непостоянны, что, как показывают работы [5; 8] на отдельных примерах, влияет на работоспособность инструмента. Рассмотрим, в частности, процесс зубофрезерования, где циклический характер нагружения инструмента выражен наиболее ярко.

Поскольку циклический характер нагружения инструмента (и всей технологической системы резания) при прерывистом резании исключить невозможно, то рассматривается возможность стабилизации (поддержания постоянными) изменений условий нагружения. Таким образом, предлагаемая методология системного подхода к проблеме повышения работоспособности инструмента состоит в том, что работоспособность рассматривается как

совокупный результат (см. рис. 1), достигаемый за счет оптимизации свойств инструментального материала, а также за счет стабилизации динамических (как результат циклического нагружения) процессов путем учета нестационарности (и её снижения) стружкообразования и повышения динамического качества станка. При этом имеется в виду, что для оценки свойств инструментальных материалов необходимы методы, адекватно отображающие (имитирующие) реальные условия эксплуатации инструмента.

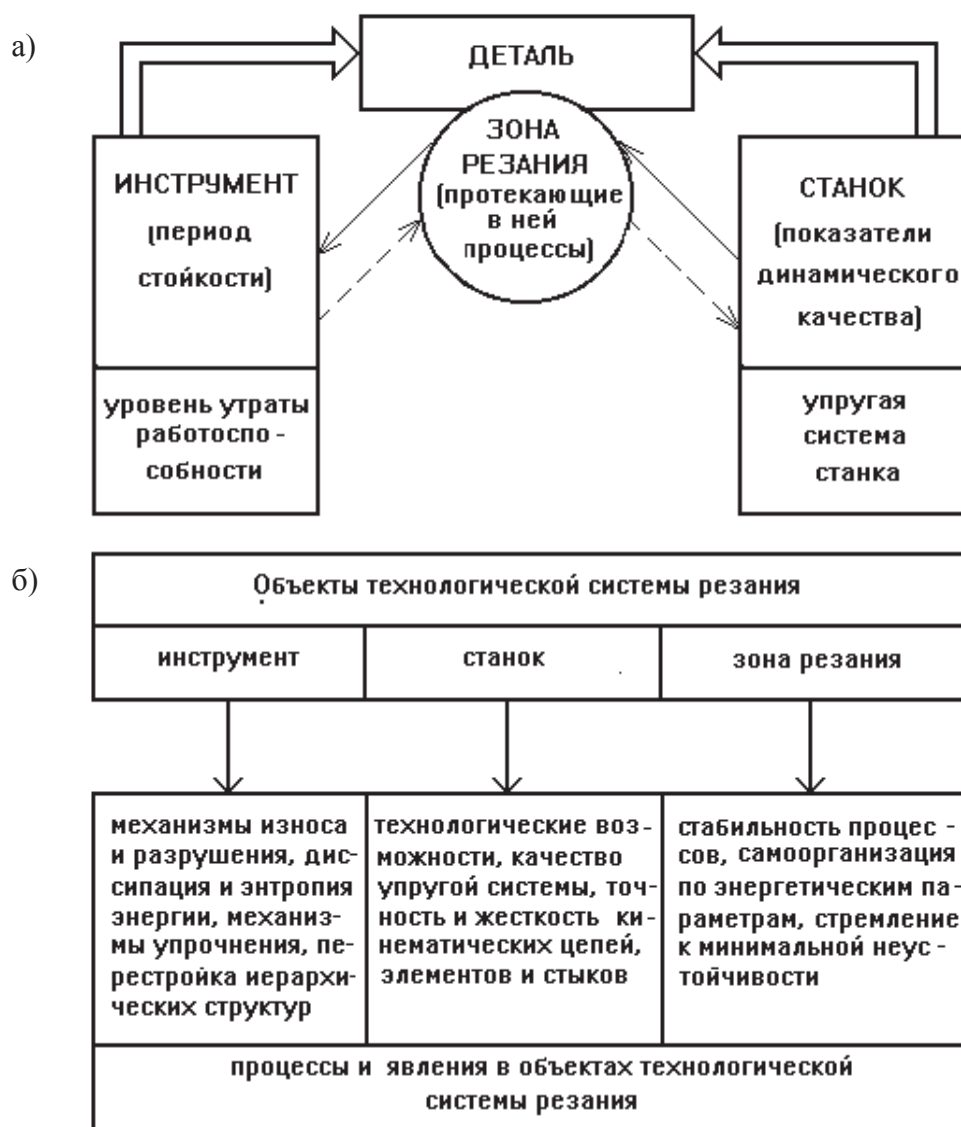


Рис. 1. Взаимосвязь в технологической системе резания:
а – взаимосвязь объектов; б – схема процессов

Последовательно рассмотрим указанные выше три взаимосвязанные задачи (оптимизация свойств инструментального материала, учет и снижение нестационарности стружкообразования, повышение динамического качества станка, т. е. его упругой системы) как средства управления работоспособностью инструмента.

Решение возможно только на основе знания закономерностей разрушения и изнашивания инструмента. Для их изучения использован структурно-энергетический подход [9], выполнены исследования с использованием просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микродифракционного анализов. Структурно-энергетический подход для многокомпонентных (композиционных) инструментальных материалов дополнен [6] моделью динамико-энергетического взаимодействия зерен (агрегаций) при



импульсном приложении нагрузки к поверхностным слоям инструмента. На основе данной модели получена зависимость, позволяющая рассмотреть накопление и диссипацию энергии в микрообъемах инструментального материала и определить критическое число $n_{кр}$ взаимодействий зерен до накопления критической энергии $E_{кр}$ в зерне, превышение которой ведет к его разрушению:

$$n_{кр} = \int_{E_0}^{E_{кр}} \left\{ 4E \left[\alpha^2 - \int_{E_0}^{E_{кр}} [j(E)/(2E)] \right] dE \right\}^{-1} dE, \quad (1)$$

где E_0 – энергия исходного импульса, Дж; E – текущая величина энергии остаточного импульса на исследуемом расстоянии от места приложения исходного импульса. Дж; j – параметр, характеризующий соотношение размера зерна и расстояния между ними (либо толщины прослойки между ними); α – угол взаимодействия зерен, град.

Анализ динамико-энергетической модели и зависимости (1) позволяет выделить некоторые варианты развития механизмов разрушения инструментального материала как путей изменения (перестройки) энергетического состояния микрообъемов при достижении критической величины энергии при резании. Это следующие варианты механизмов разрушения:

- посредством изменения параметра j реализуется механический путь, т. е. изменение целостной структуры на дробную за счет раскола зерен;
- посредством изменения угла α взаимодействия зерен реализуется геометрический путь, т. е. смещение зерен (в связке) за счет ослабления взаимодействия (границ зерно-связка и микроползучести);
- посредством изменения текущей величины E энергии реализуется физический путь, т. е. изменение каналов оттока энергии, например, за счет перестройки и образования более энергетических структур.

Это позволило сформулировать [3, 9] ряд требований к форме зерен, их размеру и расположению, а также уточнить представления о протекании различных механизмов разрушения инструментальных материалов.

Поскольку работоспособность инструмента определяется в первую очередь состоянием (величиной износа, выкрашиванием и т. д.) его поверхностных слоев, то при оптимизации свойств инструментального материала важно оценить прочность структурных составляющих (т. е. таких элементов структуры, как зерно, связка, границы) в поверхностных слоях инструмента, подверженных нормальным и касательным напряжениям в процессе внешнего трения. Такая оценка позволит выявить наиболее слабое звено в структуре, что облегчит понимание эстафеты разрушения структурных составляющих и самого механизма утраты работоспособности инструмента. Для оценки прочности материалов использованы данные работ Н. В. Новикова, Ю. Г. Кабалдина, Д. Н. Гуревича, И. Н. Чапоровой, К. С. Чернявского, Л. С. Кремнева, А. Л. Майстренко, основанные на расчете разрушающих напряжений a_p с учетом коэффициента интенсивности напряжений, вектора Бюргерса, модуля сдвига, критического размера дефекта, температуры резания и плотности дислокаций в микрообъемах.

Результаты оценки прочности твердосплавного инструмента показали (см. рис. 2, а), что наиболее слабым звеном в них являются границы: межкристаллитные в одних марках твердых сплавов, межфазные \square в других. Анализ прочности твердосплавных инструментальных материалов с позиций теории дисперсного упрочнения показал, что основной вклад в их прочность вносит реализация субструктурного и дислокационного (деформационного) механизмов упрочнения.

Результаты оценки прочности режущей керамики показали, что наиболее слабым местом в ней являются не только границы, но и зерна добавок, вносимых в ее состав (см. рис. 2, б). Причем прочность этих структурных элементов соизмерима и существенно меньше прочности зерен матрицы. Наиболее низкая прочность структурных элементов характерна для оксидной керамики, что связано с разбросом размеров её зерен, низкой

энергоёмкостью вносимых в нее добавок, наличием по границам зерен пор, преимущественно остроугольной формы. Основной вклад в прочность режущей керамики вносит реализация субструктурного и дисперсного упрочнений.

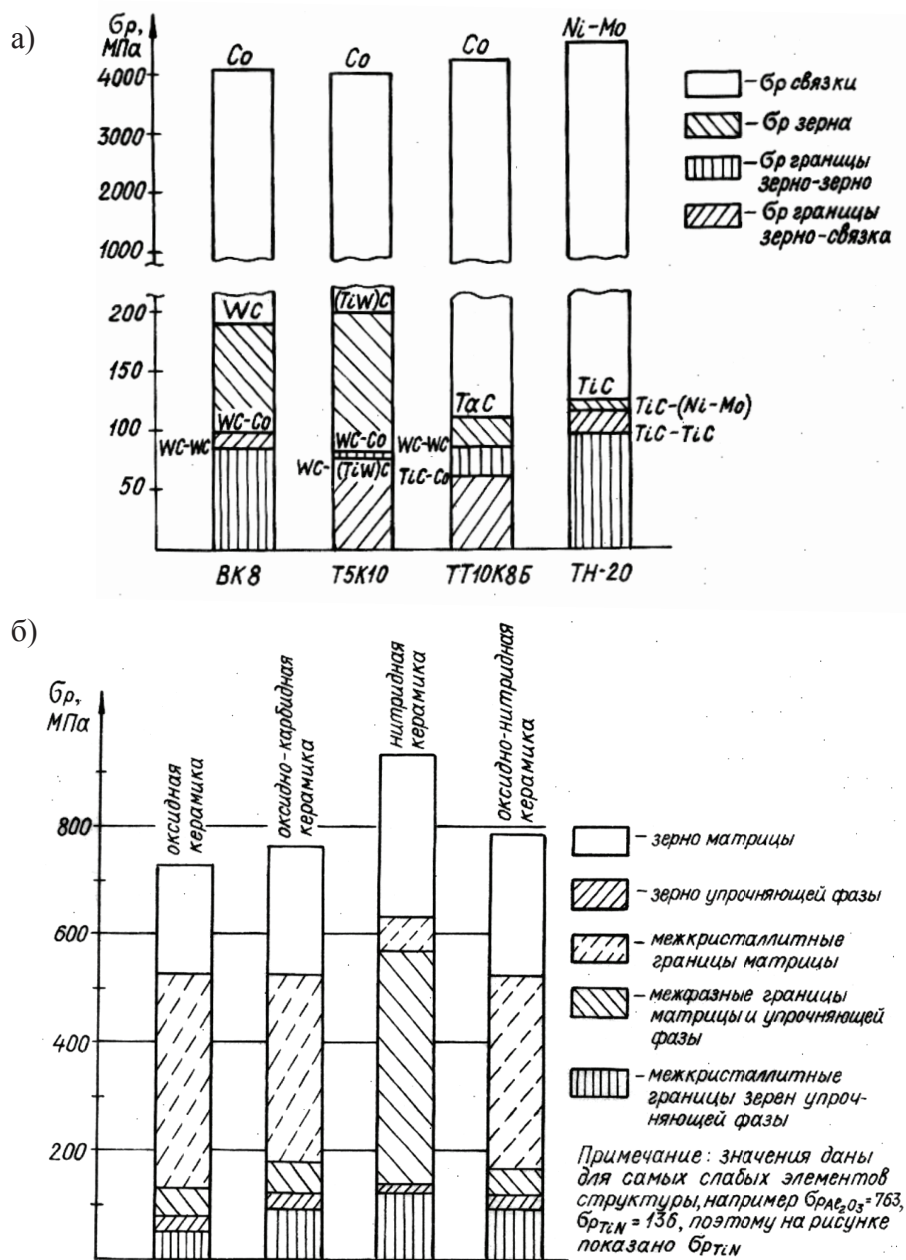


Рис. 2. Соотношение разрушающих напряжений σ_p для элементов структуры: а – твердосплавных материалов; б – режущей керамики

Сказанное выше позволило уточнить существующие представления о закономерностях разрушения инструментальных материалов в процессе внешнего трения при резании. Изложим кратко их суть, рассмотрев роль структуры (и эволюции структуры) материала в процессе разрушения твердосплавного инструмента на примере объяснения экстремальности известной классической зависимости стойкости инструмента T от скорости резания v (температуры резания θ) (см. рис. 3). На примере этой зависимости проследим влияние скорости резания (температуры) на изменение структуры (субструктуры) твердосплавного материала (преимущественно группы BK) и влияние образовавшихся

структур на механизм разрушения материала. Выделим на зависимости четыре специфические зоны, характеризующие особенности структур, образующихся в данном диапазоне скоростей резания, зоны 1 – 4 (см. рис. 3). Состояния структур и реализующиеся механизмы разрушения по зонам изложены в табл. 1.

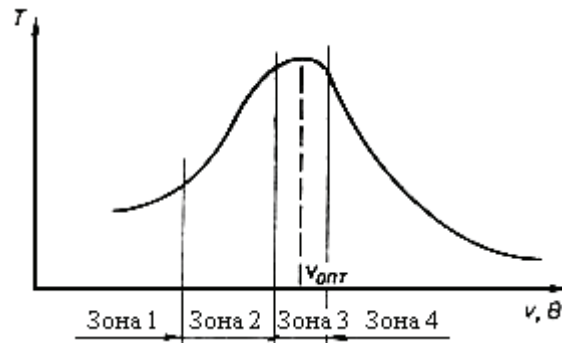


Рис. 3. Зависимость стойкости T инструмента от скорости v (температуры θ) резания и её характерные зоны

Таблица 1

Состояния структур и реализующиеся механизмы разрушения по зонам

Состояние структуры	Характеристика состояния материала до его эксплуатации (состояние поставки)	Характеристика состояния структуры материала при его эксплуатации со скоростью резания в пределах специфичных зон (см. рис. 3)			
		Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
1	2	3	4	5	6
Характерные структуры и их эволюция	Хаотичное распределение дислокаций; наличие отдельных зерен с высокой плотностью дислокаций; раскол, срез и вырыв отдельных зерен в процессе заточки (переточки)	Перемещение дислокаций с образованием скоплений; образование новых дислокаций; образование дислокационных дефектов; общий рост плотности дислокаций	Выход скоплений дислокаций на границы; образование полос скольжения и пор; выравнивание плотности дислокаций в микрообъемах поверхностных слоев	Рост плотности дислокаций до предкритического уровня; образование блоков дислокаций, стенок; блокирование дислокационной картины	Превышение критической плотности дислокаций; высокая подвижность дислокаций; распад блоков
Результаты изменения состояния материала как механизмы запасаения и диссипации энергии (при пластической деформации и внешнем трении)	Неоднородное энергетическое состояние микрообъемов в поверхностных слоях, наличие дефектов «механического происхождения»	Образование микротрещин в связке и зернах; «расшатывание» отдельных зерен в связке	Диффузионная активность границ; начало образования на границах «энергоемких» соединений; диффузия углерода из карбидов в кобальт	Измельчение структуры; фрагментация; релаксация напряжений; образование соединений и окисных фаз с высокой энергоемкостью	Деградация фрагментированной субструктуры; самодиффузия в матрице; микроползучесть матрицы; поворот и вихревой механизм отрыва карбидов
Эффекты проявления в материале образовавшихся структур	Часть зерен расколота; выступающие зерна "срезаны"; часть микротрещин слита	Отрыв с поверхности тех зерен, которые охвачены трещинами в связке или по границам; скол выступающих из связки зерен	Разориентация границ фрагментов; поворот и смещение зерен карбидов в связке; вырыв из связки отдельных зерен и группы зерен	Образование субзерен, ячеек, твердых растворов; максимальная энтропия и способность запастись энергией	Течение связки и сдвиг группы зерен; аморфизация микрообъемов; образование сетки микротрещин в связке
Плотность дислокаций, см ²	В карбидах 10 ⁶ – 10 ¹⁰ В кобальте 10 ⁶ – 10 ⁹	10 ⁶ – 10 ¹¹	10 ¹¹ – 10 ¹²	10 ¹² – 10 ¹⁴	> 10 ¹⁴

Продолжение табл. 1

Мокрицкий Б. Я., Панова Е. А., Козлова М. А., Саблин П. А.
К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА: ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1	2	3	4	5	6
Наиболее слабое звено в структуре с позиций прочности	Прочность не лимитирована, так как нет нагрузки, но ослаблены те микрообъемы, которые имеют в результате заточки сколы и трещины	Межкристаллитные границы и в локальных микрообъемах – межфазные границы	Межфазные и межкристаллитные границы, в локальных микрообъемах – зерна карбидов	Межфазные и межкристаллитные границы, зерна карбидов, в локальных микрообъемах – зерна добавок	Связка, так как под воздействием высокой температуры реализуется ее ползучесть
Преимущественный механизм разрушения как результат реализации образовавшейся структуры и влияния слабого звена	-	Магистральная трещина идет преимущественно по межкристаллитным границам. В межфазные границы ответвлений мало. Вся энергия трещины реализуется в лидирующем направлении, скорость ее роста высокая	Магистральная трещина растет с разветвлениями путем разрушения межфазных и межкристаллитных границ с расколом отдельных (крупных) зерен	Так как слабых звеньев много, то образуется система разветвленных трещин, часть которых, сливаясь, образует магистральную трещину. Рассеяние энергии значительно, в лидирующем направлении скорость роста трещины низкая	Сдвиг связки и смещение группы зерен по ней, что приводит к изменению формы (опусканию) лезвия

Эти закономерности разрушения положены в основу оптимизации свойств инструментальных материалов с повышенной работоспособностью и разработку методов их упрочнения, в том числе за счет нанесения покрытий. Некоторое представление об основных направлениях повышения работоспособности инструмента за счет совершенствования и оптимизации свойств инструментального материала дано в табл. 2.

Таблица 2

Основные направления повышения работоспособности инструмента за счет совершенствования и оптимизации свойств инструментального материала

Составляющие решения проблемы	Основные направления повышения работоспособности инструмента										
	быстрорежущего		из твердого сплава							из керамики	из СТМ
Путь решения	Подготовка основы	Конструкция, состав покрытия	Слоистые пластины	Улучшение основы	Управление свойствами покрытия в процессе его нанесения	Конструкция, состав и метод нанесения покрытия			Улучшение свойств покрытия	Стабилизация свойств	Стабилизация свойств
Средство решения	Ионное азотирувание	Композиционные и «мягкие» слои	Легирование поверхностного слоя	Алмазная термобработка, легирование	Ионное азотирование, КИБ + ГТ, ГТ + КИБ	Композиционные	Многофазные	С защитным слоем	Лазерное, термомеханическое воздействие	Термообработка, конструкция и состав покрытия	Термообработка
Сведения о решении	А. с. СССР 1354754 1394745 1401726	А. с. СССР 1466261 1501534	А. с. СССР 1397528 1446769 1513796	А. с. СССР 1319424 1364764 1351154 1436347 1446769	А. с. СССР 1322605 1446769 1466261 1367629 1302074 1372978 1383821	А. с. СССР 1364767 1368499 1388620 1385641 1394746 1401726	А. с. СССР 1324325 1361164 1364557 1322605 1324325 1342047	А. с. СССР 1354557 1365393 1383621	А. с. СССР 1353621 1365393 1292995	А. с. СССР 1520890 1616056 1720250 1759035 1766095	А. с. СССР 1642645 1670880 1707991



Ранее отмечалось, что совершенствование свойств инструментальных материалов подразумевает наличие надежных экспресс-методов оценки работоспособности инструмента. В дополнение к имеющимся общеизвестным методам оценки физико-механических и эксплуатационных характеристик инструментальных материалов разработан [9] ряд экспресс-методик оценки некоторых дополнительных параметров (например, термостойкости, трещиностойкости и т. д.), позволяющих за счет использования внутреннего трения, экзоэлектронной или акустической эмиссии проводить контроль, оценку качества, диагностику и прогнозирование работоспособности инструмента. Некоторое представление о разработанных с участием авторов методах дает табл. 3, в нижней строке приведены источники информации, в которых описаны данные методы.

Таблица 3

Сведения о количестве и новизне технических решений,
разработанных с участием авторов

Контролируемый параметр	Физико-механические свойства	Энергетическая стабильность	Трещиностойкость		Качество сцепления покрытия с основой		Термостойкость		Величина износа
Метод контроля	Акустическая эмиссия	Экзоэлектронная эмиссия	Акустическая эмиссия		Акустическая эмиссия		Акустическая эмиссия		Электрический
Метод воздействия на образец	Индетором	Термо- и фотостимуляция	Индетором		Индетором		Лазерный (тепловой)		Замыкание электрической цепи
Характер воздействия	Статический	Сканирование поверхности	Статический	Динамический	Статический	Динамический	Непрерывный	Циклический	В процессе резания
Сведения о решении	А. с. СССР 1342227	-	А. с. СССР 1522913 1342227	А. с. СССР 1711569 1711568 1752059 1667497	А. с. СССР 1382175	А. с. СССР 1752059 1667497	А. с. СССР 1623409 1456841	А. с. СССР 1623409 1456841	А. с. СССР 1566598 1585081 1585082

В дополнение к сказанному приведем сведения о применении микрорезания (на глубину нескольких микрометров) для исследования микроразрушения поверхностных слоев инструмента, в том числе с покрытиями. Микрорезание специальным или стандартным (алмазная пирамида или конус) индетором осуществлялось по принципу маятника или скрайбирования со скоростями резания, скоростями деформирования, энергией разрушения и температурой испытания, аналогичными действующим в реальных условиях резания. Информация при микрорезании снималась методом акустической эмиссии, результаты обрабатывались на ЭВМ по преобразованному акустическому сигналу. Сопоставление результатов обработки с микрофрактографическими исследованиями позволило выделить информативные параметры, адекватно отражающие величину и характер разрушения. Это позволило по параметрам акустического сигнала выявить механизм разрушения испытуемого материала (в том числе покрытия), интенсивность его протекания при тех или иных условиях нагружения и прогнозировать работоспособность инструмента при заданных условиях резания. Так, на рис. 4 показана возможность использования в качестве информативного параметра частотного спектра акустического сигнала. Из рисунка видно, что характеристические (пиковые) частоты существенно различны для разных инструментальных материалов. По ним можно проводить идентификацию материалов и сопоставлять качественные признаки образцов из серии с эталоном. По другим информативным параметрам удастся оценивать прочность сцепления покрытия с основой, трещиностойкость материала или покрытия и основы и другие эксплуатационные характеристики.

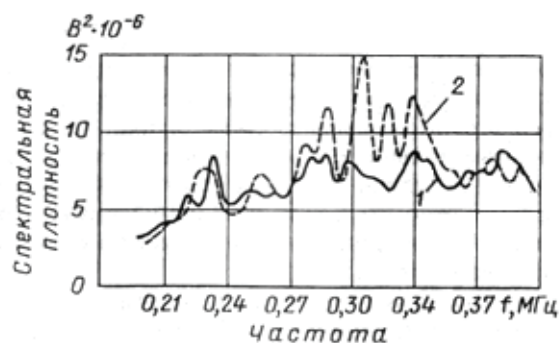


Рис. 4. Идентификационный частотный спектр акустического сигнала при микрорезании по методу маятника инструментальных материалов: 1 – сплав ВК8; 2 – сплав ВК8 с покрытием Zr + ZrN

В рамках такого систематического подхода предложенные методы оценки качества, диагностики и прогнозирования работоспособности инструмента можно рассматривать как дополнительное средство управления работоспособностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беккер, М. С. Физическая модель изнашивания инструмента из быстрорежущей стали / М. С. Беккер, М. Ю. Куликов, Е. В. Егорычев // Вестник машиностроения. – 1997. – № 8. – С. 41-44.
2. Беккер, М. С. Роль структуры инструментального материала в процессе изнашивания твердосплавного инструмента / М. С. Беккер, М. Ю. Куликов, А. В. Никоноров // Вестник машиностроения. – 1997. – № 10. – С. 30-33.
3. Кабалдин, Ю. Г. Стойкость режущего инструмента, оснащенного керамикой и сверхтвердыми материалами / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, А. И. Пронин // Станки и инструмент. – 1991. – № 12. – С. 19-21.
4. Кабалдин, Ю. Г. Синергетика. Управление процессами механообработки в автоматизированном производстве / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 1997. – 260 с.
5. Кудинов, В. А. Схема стружкообразования (динамическая модель процесса резания) / В. А. Кудинов // Станки и инструмент. – 1992. – № 10. – С.14-17; № 11. – С. 26-29.
6. Мокрицкий, Б. Я. Структурно-динамические аспекты при оценке работоспособности металлорежущего инструмента / Б. Я. Мокрицкий // Изв. вузов. Машиностроение. – 1990. – № 11. – С. 122-128.
7. Мокрицкий, Б. Я. Технологическая система резания как система преобразования входных параметров в выходные / Б. Я. Мокрицкий // Изв. вузов. Машиностроение. – 1992. – № 4-6. – С. 102-108;
8. Подураев, В. Н. Разработка и реализация способа управления оптимальным режимом резания / В. Н. Подураев, В. В. Закураев // Вестник машиностроения. – 1996. – № 11. – С. 31-36.
9. Современные методы конструирования, контроля качества и прогнозирования работоспособности режущего инструмента / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, Н. А. Семашко, С. П. Тараев. – Владивосток: Изд-во ГУ, 1990. – 122 с.



Богданова Н. А. Черномас В. В., Соснин А. А., Севастьянов Г. М., Полищук А. А.
Nina A. Bogdanova, Vadim V. Chernomas, Alexandre A. Sosnin, Georgy M. Sevastyanov,
Alexandre A. Polishchuk

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ
ПРИ ОСАДКЕ НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАКРЫТОМ ШТАМПЕ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMATION PROCESS DURING
COMPRESSION OF HETEROGENEOUS MATERIAL IN A CLOSED DIE**

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

Ms. Nina A. Bogdanova – PhD student, 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

Черномас Вадим Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией проблем металлотехнологий 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 a Laboratory at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru.

Соснин Александр Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru.

Mr. Alexander A. Sosnin – Ph.D. of Engineering, staff researcher at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru.

Севастьянов Георгий Мамиевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Georgiy M. Sevastyanov – Ph.D. in Physics and Mathematics, staff researcher at the Institute for Machine Engineering and Metallurgy of the Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru.

Полищук Александр Анатольевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru.

Mr. Alexander A. Polishchuk – undergraduate student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mail@imim.ru.

Аннотация. Представлена методика, позволяющая зафиксировать динамику уплотнения неоднородного плоского образца в процессе его осадки в закрытом штампе при различных скоростях деформирования и условиях контакта в системе «образец – матрица – пуансон». Показаны кривые, характеризующие энергосиловые затраты на процесс деформирования, положение центров пор в декартовых координатах, изменение углов поворота наибольших осей эллипсов, вписанных в поры, в зависимости от степени деформации образца.

Summary. In this paper we suggest a method for recording the dynamics of densification of a heterogeneous plate specimen during its compression in a closed die at various speeds of deformation in the system "sample – matrix – die". We show the curves that characterize: power demands for the process of deformation, the position of pore centers within the Cartesian coordinates, the change of rotation angles of the greatest ellipse axes entered in a pore depending on the extent of deformation of a sample.

Ключевые слова: осадка, деформация, фронт уплотнения, пористый плоский образец.

Key words: densification, strain, compression front, heterogeneous plate specimen

УДК 621.77.014

Введение

Вопросы физического моделирования процессов деформирования неоднородных материалов являются чрезвычайно актуальными при разработке адекватных моделей технологических процессов обработки материалов давлением. Современные тенденции развития методов пластического деформирования материалов направлены на интенсификацию производственных процессов за счет уменьшения количества технологических переходов от базовой заготовки к конечному изделию и связаны с увеличением степени деформации материала за один технологический цикл. Среди этих направлений можно выделить: формирование изделий из материалов в твердожидком состоянии [2 – 5; 12; 17; 19; 20] и получение изделий из неоднородных, обычно пористых, материалов [6; 11; 13; 16; 21]. Основной особенностью указанных процессов является то, что материал деформируемой заготовки, в отличие от традиционных процессов обработки материалов давлением, имеет определенные значения исходной пористости. В первом случае материал заготовки представляет собой определенным образом структурированный каркас из твердого (твердофазного) материала, внутреннее пространство которого заполнено расплавленным металлом (жидкой фазой). Во втором случае – твердофазный материал с открытой, закрытой или смешанной газовой пористостью (вспененный материал). Одними из основных требований, предъявляемых к процессам получения изделий из таких заготовок, являются отсутствие (минимизация) пористости в конечном изделии и снижение удельных энергетических затрат на сам процесс деформирования. Энергосиловые параметры процесса деформирования и эволюция структуры таких заготовок в технологиях холодной и горячей объемной штамповки существенно отличаются от технологий получения металлоизделий из традиционных (кристаллических) материалов, что требует уточнения существующих и разработки новых моделей, описывающих формирование напряженно-деформированного состояния в системе «заготовка–инструмент деформации». Необходимость решения теоретических задач, связанных с деформированием структурно неоднородных материалов привела к созданию в конце XX в. нового раздела механики деформируемого твердого тела – механики композитов. Развитие механики композитов в СССР и России связано с именами Ю. Н. Работнова, Б. Е. Победря, Ю. М. Тарнопольского; за рубежом – Р. Кристенсена и многих других [10; 14; 15; 18]. В большинстве работ при моделировании поведения разнородного материала используется принцип эквивалентной гомогенности, при котором неоднородный материал рассматривается как некий абстрактный однородный материал с осредненными теплофизическими, реологическими и физико-механическими свойствами. При этом осреднение характеристик проводится преимущественно посредством решения краевых задач механики для представительного объема, содержащего неоднородность [1, 9]. Наряду с построением теоретических моделей процессов деформирования и разрушения неоднородных материалов проводятся и экспериментальные исследования, результаты которых служат как для верификации созданных моделей, так и для инженерных расчетов технологических параметров процессов обработки металлов давлением [6; 11]. Однако, несмотря на наличие существенного числа работ по механике пористых сред, посвященных влиянию характеристик материала матрицы и объемного содержания пор (степени пористости) на энергосиловые параметры при деформировании неоднородного материала, до конца не изученными остаются эволюция структуры материала в процессе деформирования и влияние геометрических характеристик исходных пор в заготовке на эти параметры.

Методика проведения исследований

На первоначальном этапе исследования процесса осадки пористого плоского образца была разработана методика, позволяющая зафиксировать динамику его уплотнения в закрытом штампе. С этой целью сборную закрытую матрицу выполняли из прозрачного материала (оргстекло марки ТОСН по ГОСТ 17622–72) с толщиной стенки 10 мм (см. рис. 1).

Фиксирование процесса уплотнения производили высокоскоростной видеосъемкой через переднюю фронтальную стенку матрицы, подсвеченную контрольным светом через заднюю фронтальную стенку для исключения образования контурных теней и бликов на кадрах видеозаписи.

а)



б)

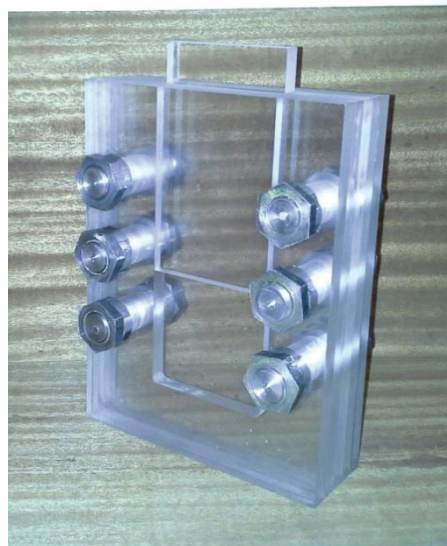


Рис. 1. Внешний вид матрицы в разобранном (а) и собранном виде (б)

По раскадровке видеосъемки, выполненной с помощью программного пакета «Adobe Premiere Pro CS6», в дальнейшем оценивали изменение геометрических размеров пор и их взаимного расположения в процессе деформации (площадь поперечного сечения, положение центров отверстий в декартовых координатах, величины главных осей деформированных отверстий и углы поворотов наибольших главных осей относительно вертикали).

Неоднородность образца (открытую пористость, равную 0,25) задавали с помощью равномерно распределенных по фронтальной плоскости отверстий диаметром 8 мм (см. рис. 2).

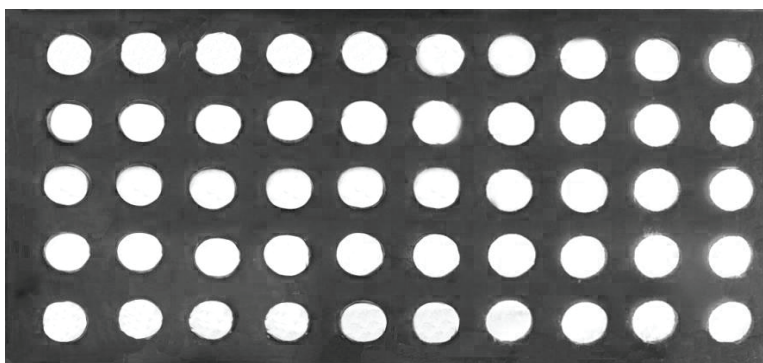


Рис. 2. Внешний вид образца

Измерение и запись величин перемещений пуансона и значений силовых параметров процесса уплотнения образца проводили с помощью блока автоматической регистрации данных на экспериментальном стенде, оборудованном на базе испытательной электромеханической машины Instron 3382 (см. рис. 3).

Условия контакта поверхностей образца со стенками закрытой матрицы и плоскостью пуансона оценивали через идеальные значения фактора трения (0 и 1), максимальное значение которого соответствовало идеальному контакту, а минимальное – контакту через слой силиконовой смазки по ТУ 2384–032–56751830–2007.

Идеализация условий контакта при физическом моделировании связана с двухуровневым изменением независимого фактора. Его фактические значения могут быть рассчитаны с использованием закона трения Зибеля с уточнениями, характеризующими свойства материала и схему его деформирования [8].

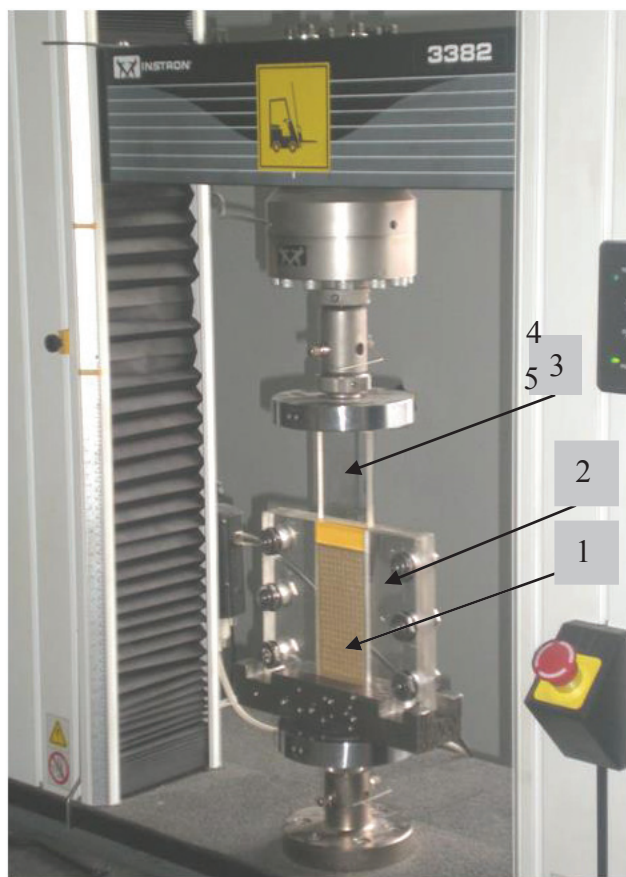


Рис. 3. Стенд для проведения испытаний:
1 – образец; 2 – матрица; 3 – пуансон

Скорость деформирования при проведении испытаний выбирали из рекомендуемого интервала скоростей деформирования, характерных для обработки материалов давлением, и устанавливали на двух уровнях – минимальной (0,5 мм/с) и максимальной (5 мм/с) с помощью управления скоростью перемещения подвижной цапги узла нагружения испытательной машины Instron 3382.

Откликами эксперимента являлись данные в виде кривой в координатах «нагрузка – перемещение», синхронизированные с раскадровкой видеосъемки, а также данные изменения геометрических размеров пор и их взаимного расположения.

Экспериментальные данные изменения геометрических параметров пор (отверстий) и их взаимного расположения фиксировали для рядов отверстий, расположенных вблизи продольной оси симметрии образцов по схеме, представленной на рис. 4. При этом точка отсчета (центр координат), относительно которой определяли линейные смещения центров анализируемых пор (на рис. 4 зачернены и обозначены цифрами) в направлении осей OX и OY, находился в верхнем левом углу образца. Угловые отклонения наибольших осей деформированных пор отсчитывали относительно оси OY.

Изображения, полученные при раскадровке видеосъемки с шагом, кратным перемещению пуансона, масштабировали и в среде программного пакета Image-Pro. Plus производили измерения указанных выше геометрических параметров с точностью равной: 0,01 мм по линейным размерам и 0,1 градуса по угловым размерам.

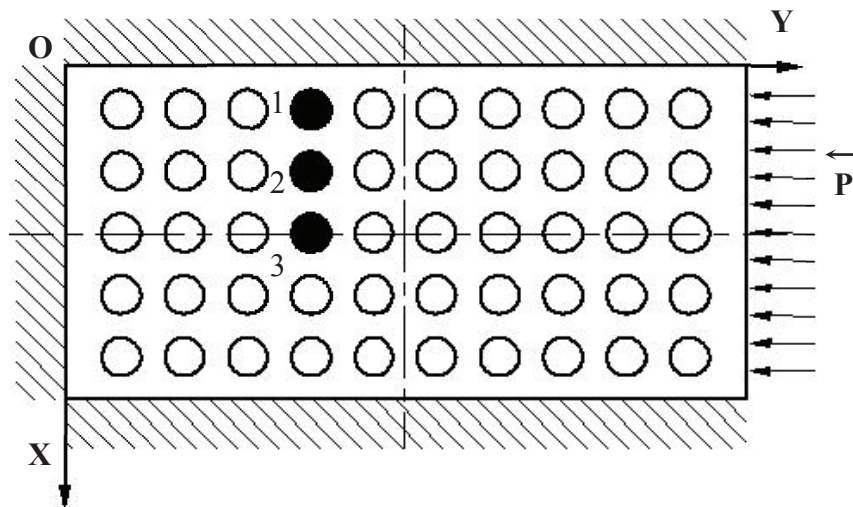


Рис. 4. Схема для оценки изменения геометрических параметров отверстий

На рис. 5 представлена схема измерения геометрических параметров пор. В контуры исходных пор (см. рис. 5, а) вписывалась окружность диаметром $d_0 = l_{\min} = l_{\max}$, где l_{\min} – длина минимальной оси эллипса; l_{\max} – длина максимальной оси эллипса. Принимали, что направление максимальной оси эллипса исходных отверстий совпадает с направлением оси ОХ. Отсчет угла поворота максимальной оси эллипса α производили от направления оси ОУ (для исходных отверстий $\alpha_0 = 90^\circ$).

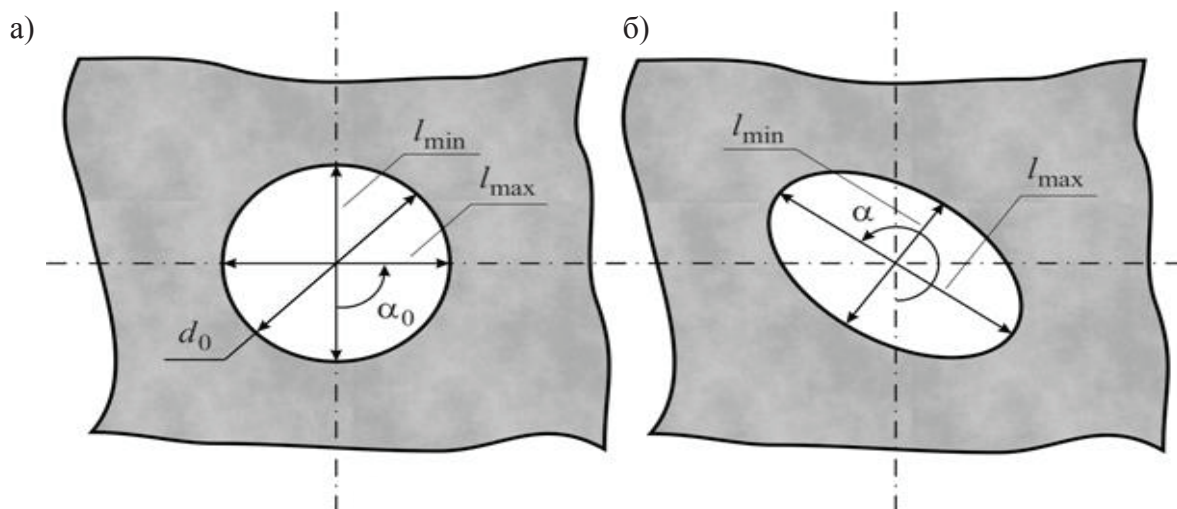


Рис. 5. Схема определения геометрических параметров пор:
а – до деформации; б – после деформации

Относительные отклонения размеров осей эллипсов и изменение площадей пор (ΔS) определяли из соотношений: $\Delta l_{\min} = d_0 - l_{\min}$; $\Delta l_{\max} = l_{\max} - d_0$; $\Delta S = (S - S_0) / S \cdot 100\%$, где S_0 и S – соответственно площади вписанных в поры эллипсов до и после деформации.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальное исследование процесса осадки пористого образца проводили для серий экспериментов, отличающихся между собой скоростью деформирования и условиями контакта образцов со стенками матрицы и пуансоном (см. табл. 1).

На рис. 6 представлены кривые, показывающие положение центров ряда пор (отверстия 1 – 5) в направлении осей OX и OY в процессе деформирования образцов для четырех серий экспериментов.

Таблица 1

Номер серии эксперимента	Скорость деформирования, мм/с	Фактор трения
1	0,5	1
2	5,0	1
3	0,5	0
4	5,0	0

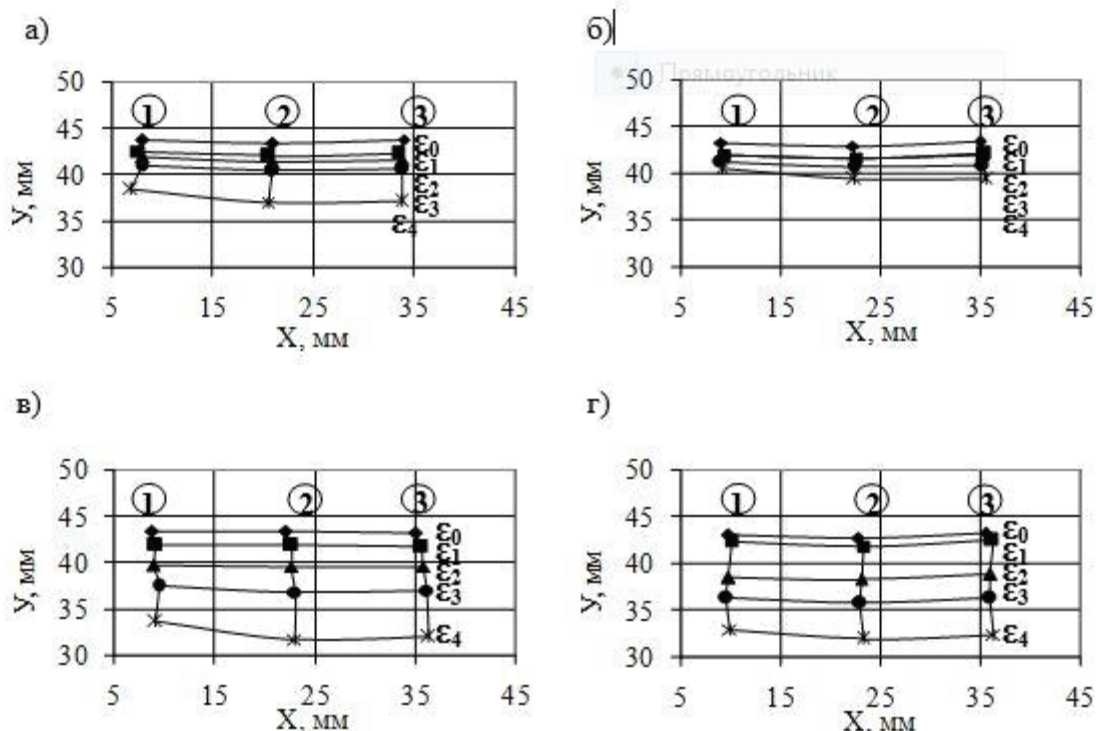


Рис. 6. Перемещение центров пор образцов в процессе деформации по сериям экспериментов: а – серия 1; б – серия 2; в – серия 3; г – серия 4;

Степень деформации образцов ε_i при перемещении пуансона на 0, 5, 15, 25 и 35 мм соответственно составляла $\varepsilon_0 = 0$, $\varepsilon_1 = 0,03$, $\varepsilon_2 = 0,1$, $\varepsilon_3 = 0,17$, $\varepsilon_4 = 0,25$. Указанные кривые, опорные точки которых соответствуют средним значениям для трех экспериментов в каждой из серий, характеризуют движение фронта уплотнения в процессе деформирования образца. Расположение центров пор до начала процесса деформирования описывается для каждой из серии экспериментов кривыми ε_0 , остальные кривые определяют динамику процесса уплотнения материала образца до конечной степени деформации ε_4 . Характер перемещения центров пор свидетельствует о влиянии фактора трения и скорости деформирования на формирование фронта уплотнения материала в процессе осадки, причем оно наиболее ярко выражено при максимальной степени деформации. На начальных стадиях деформирования смещение центров отверстий по координате Y имеет практически линейный характер. При степенях деформации больше ε_2 фронт уплотнения постепенно приобретает параболическую форму. Это связано с увеличением сопротивления деформации материала в верхней части образца из-за его уплотнения. Наибольшее перемещение центров пор относительно оси Y , равное 11,2 мм, наблюдается для образцов, деформируемых при минимальном значении

фактора трения и максимальной скорости деформирования (см. рис. 6, з). Минимальное смещение, равное 5,3 мм, соответствует условиям деформирования при максимальном факторе трения и максимальной скорости (см. рис. 6, б).

При проведении экспериментов было установлено, что наибольшему формоизменению в процессе деформации подвержена пора, находящаяся вблизи боковой контактной поверхности образца со стенкой матрицы – отверстие № 1 (см. рис. 4).

В табл. 2 представлены результаты изменения размеров осей эллипсов Δl_{\min} и Δl_{\max} в процессе деформирования отверстия, характеризующие изменение геометрических параметров. Аналогичные данные получены для остальных рассматриваемых пор.

Таблица 2

Степень деформации	Номер серии*			
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4
ϵ_1	-0,05/0,11	0,03/0,67	0,06/0,67	0/0,67
ϵ_2	-0,05/0,56	0,04/0,69	0,64/0,97	0,05/0,96
ϵ_3	1,2/3,31	0,32/0,92	0,65/1,88	0,17/1,71
ϵ_4	3,35/6,14	0,47/1,6	2,29/3,7	1,48/4,36

*в числителе Δl_{\max} , мм; в знаменателе Δl_{\min} , мм

На рис. 7 показано изменение углов поворота наибольших осей эллипсов, вписанных в деформированные поры для четырех серий экспериментов. Представленные данные совместно с данными табл. 2 характеризуют формоизменение пор в процессе деформирования.

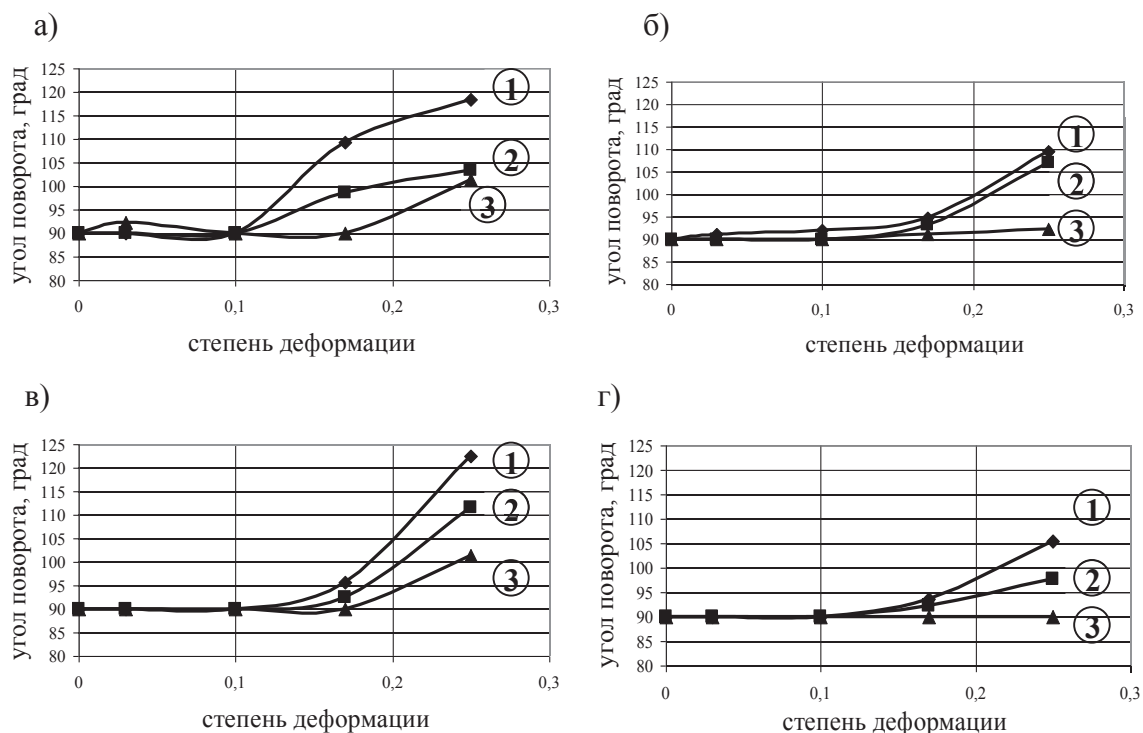


Рис. 7. Изменение углов поворотов наибольших осей эллипсов, вписанных в поры в процессе деформации по сериям экспериментов: а – серия 1, б – серия 2, в – 3 серия, г – 4 серия; ① – ③ – номера отверстий

Характер изменения геометрических размеров пор зависит от фактора трения и удаленности поры от боковой контактной поверхности образца с матрицей. Наибольшему формоизменению подвергаются поры, расположенные вблизи контактной поверхности (отвер-

стия 1, 2). При степенях деформации больше 0,15 угол поворота наибольших осей эллипсов начинает возрастать. При факторе трения $f = 1$ (серии 1, 2 экспериментов) с увеличением скорости деформирования уменьшается Δl_{\max} (3,35 мм и 0,47 мм соответственно). При факторе трения $f = 0$ изменение наибольшей оси эллипса Δl_{\max} также уменьшается (2,29 мм и 1,48 мм соответственно).

На рис. 8 представлено распределение усилий деформирования для различных серий экспериментов. Видно, что при максимальном значении фактора трения $f = 1$ (см. рис. 8, кривые 1, 2) энергетические затраты на процесс деформирования выше, чем при минимальном – $f = 0$ (см. рис. 8, кривые 3, 4). Максимальное усилие, возникающее в конце процесса деформирования, составляет 1361,8 Н и соответствует серии 2 экспериментов. Минимальное усилие, возникающее в конце процесса деформирования, составляет 370,3 Н и соответствует серии 3 экспериментов. Также очевидно влияние скорости деформирования на процесс осадки. При идеальных условиях контакта с увеличением скорости деформирования происходит увеличение нагрузки с 739,1 до 1361,8 Н, при условии деформирования со смазывающим покрытием наблюдается увеличение нагрузки с 370,3 до 649,4 Н.

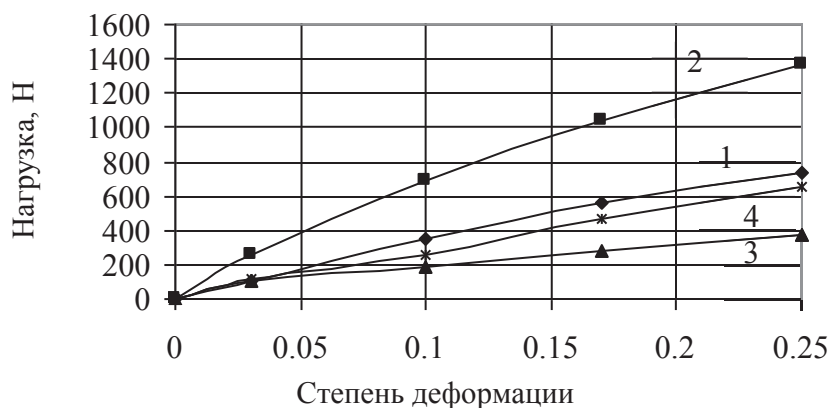


Рис. 8. Распределение усилий деформирования для различных серий экспериментов: 1 – серия 1; 2 – серия 2; 3 – серия 3; 4 – серия 4

Из представленных на рис. 5 – 7 и в табл. 2 результатов экспериментальных исследований видно, что однозначно сделать вывод о преимущественном влиянии того или иного фактора на процесс достаточно сложно. В табл. 3 представлены данные откликов эксперимента, полученные после обработки всех серий экспериментов на примере эволюции поры (отверстия) № 1 (см. рис. 4).

Таблица 3

№ п.п.	Значения факторов			Значения откликов				
	ϵ	v , мм/с	f	α , град	Δl_{\max} , мм	Δl_{\min} , мм	ΔS , %	P , Н
1	0,03	0,5	0	90,0	0	0,67	8,26	103,29
2	0,25	0,5	0	122,6	1,48	4,36	62,95	370,32
3	0,03	5,0	0	90,0	0,06	0,67	9,07	114,52
4	0,25	5,0	0	105,5	2,29	3,70	61,67	649,44
5	0,03	0,5	1	90,0	-0,05	0,11	0,76	103,69
6	0,25	0,5	1	118,4	3,35	6,14	86,53	739,05
7	0,03	5,0	1	91,1	0,03	0,67	8,72	261,9
8	0,25	5,0	1	109,44	0,47	1,60	24,71	1361,81



Выводы

В результате экспериментального исследования процесса осадки неоднородного материала в закрытой матрице получены данные, характеризующие формоизменение пор и распределение усилий в зависимости от фактора трения, скорости деформирования и степени деформации. Предложена методика оценки изменения геометрических параметров пор в процессе деформирования, позволяющая определить фронт уплотнения материала. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для построения модели, описывающей деформацию неоднородной среды с учетом сжимаемости материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, С. Е. Прессование уплотняемого пластического материала в закрытой матрице / С. Е. Александров, Б. А. Друянов // ПМТФ. – 1990. – №1. – С. 117-123.
2. Бочаров, Ю. А. Взаимное влияние температуры нагрева заготовки и скорости деформирования в тиксотехнологиях / Ю. А. Бочаров, И. М. Койдан // Известия вузов. Машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 69-74.
3. Бочаров, Ю. А. Параметры тиксоштамповки осесимметричных поковок из алюминиевого сплава А356 / Ю. А. Бочаров, Л. В. Хижнякова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 10. – С. 36-40.
4. Влияние жидкофазного горячего изостатического прессования на свойства литых алюминиевых сплавов. Часть 1. Структура и свойства сплава АК7С, полученного литьем в песчаные формы / Е. В. Иванова, Д. В. Тагиров, Р.О. Кайбышев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 2. – С. 11-17.
5. Исследование процесса формирования металлоизделий на установке вертикального литья и деформации металла / В. В. Черномас, С. В. Ланкина, В. И. Одинокоев // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2012. – № I-1(9). – С. 90-93.
6. Исследование уплотнения при деформации пористых материалов / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, А. Е. Максименко, М. В. Лысюк // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 3 (Ч. 1). – 2011. – С. 440-448.
7. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. 420 с.
8. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин, Б. Р. Картак, Ю. В. Ашпур, Ю. И. Спасский. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
9. Краснощеков, П. И. Упругие модули изотропных порошковых и пористых материалов / П. И. Краснощеков, А. Ф. Федотов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2006. – Вып. 43. – С. 81-87.
10. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1982. – 336 с.
11. Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов / А. В. Власов, В. Н. Субич, Н. А. Шестаков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 3. – С. 31-35.
12. Параметрическое трехмерное моделирование установки вертикального литья и деформации металла / В. В. Черномас, С. В. Ланкина, С. Р. Саликов, Н. Ю. Лушников // Ученые записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2012. – № I-1(9). – С. 75-82.
13. Пластическая деформация пористых материалов / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, В. А. Демин. – М.: МГИУ, 2008. – 276 с.
14. Победря, Б. Е. Механика композиционных материалов / Б. Е. Победря. – М.: МГУ, 1984. – 336 с.
15. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
16. Расчетный метод построения истинных кривых упрочнения пористых и композиционных материалов / Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, Д. А. Власов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 10. – С. 15-20.
17. Семенов, Б. И. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии / Б. И. Семенов, К. М. Куштаров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 223 с.
18. Тарнопольский, Ю. М. Прикладная механика композитов / Ю. М. Тарнопольский. – М.: Мир, 1989. – 358 с.

Ким В. А., Каримов Ш. А.
Vladimir A. Kim, Shoir A. Karimov

**ПРОЯВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ
ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ, ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ**

**MANIFESTATIONS OF PHYSICAL MESOMECHANICS AT CONTACT INTERACTION,
FRICTION AND WEAR**



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

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



Каримов Шоир Ахралович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология металлов» Ташкентского государственного технического университета (Республика Узбекистан, Ташкент).

Mr. Shoir A. Karimov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Metal Technology, Tashkent State Technical University (Republic of Uzbekistan, Tashkent).

Аннотация. Процессы трения и изнашивания протекают в поверхностном слое, которому в трибо-технической системе отводится особая роль. Пластическая деформация поверхностного слоя при трении вызывает специфические структурные изменения (фрагментацию структуры) и развитие концентраторов напряжений разномасштабных уровней (бифуркационные центры). При структурной самоорганизации бифуркационные центры трансформируются или в диссипативные источники и генераторы различных носителей пластической деформации, или в очаги разрушения материала.

Summary. Friction and wear processes take place in the surface layer which in the triboengineering system has a special role. Plastic deformation of the surface layer at friction causes specific structural changes (structural fragmentation) and leads to the emergence of stress raisers at different scale levels (bifurcation centers). During structural self-organization, these bifurcation centers are transformed either into sources of dissipation and generators of various plastic deformation carriers, or into sites of break-down of the material.

Ключевые слова: трение, износ, покрытия, износостойкость, напряжения, тепло, диффузия, вторичные структуры.

Key words: friction, wear, coatings, wear resistance, stress, heat, diffusion, secondary structures.

УДК 621.9.026



Введение

Все попытки объединения различных теорий триботехнического процесса сталкиваются с трудностью, связанной с большим разнообразием механизмов трения и изнашивания, представляющих сложную комбинацию физико-химических и механических процессов, протекающих на разномасштабных уровнях контактного взаимодействия. Так, микроструктурная динамика, изменение химического состава материала, генерация потока дефектов кристаллического строения и продуктов износа протекают на масштабных уровнях порядка 10...100 нм, а топографические изменения поверхности трения, определяющие плотность потока механической энергии, формируются на уровнях порядка 0,1...1,0 мм. Различие этих уровней на девять порядков делает невозможным их описание в рамках единой модели. Физическая мезомеханика не решает эту проблему, но раскрывает деформационно-структурную связь между макро-, мезо- и микроуровнями, по которым происходит передача энергетических потоков и их диссипация в контактном процессе трения и изнашивания, позволяет выйти на новый уровень описания процесса и его прогнозирования [1; 4; 5; 8; 10].

Поверхностным слоям твердых тел отводится особая роль при деформации и разрушении материала, поэтому их выделяют в отдельную структурную систему, в которой функционируют поверхностные концентраторы напряжений, каналы релаксации напряжений и диссипации подводимой энергии. При трении и изнашивании роль поверхностных слоев значительно возрастает в связи с тем, что через них происходит передача механической энергии контактного взаимодействия, и в них локализуются все процессы трибологического характера.

В статье приведены результаты исследования изменений микроструктуры и топографии поверхностных слоев пар трения и сделана попытка раскрытия происходящих процессов с точки зрения физической мезомеханики.

Методика исследования

Объектом проведенного исследования были поверхности трения реальных деталей триботехнических систем, а также специальные образцы из конструкционных сталей и медных сплавов после их испытания на трение и изнашивание на машине трения СМТ-2 по схеме «диск – колодка». Режимы испытания обеспечивали различные варианты контактного взаимодействия от сухого трения до жидкостного.

Микроструктура поверхностных слоев исследовалась на металлографическом микроскопе Микро-200, топография поверхности трения фиксировалась биологическим микроскопом Primo Star компании ZEISS и электронным растровым микроскопом S3400N компании Hitachi.

Поверхность трения как объект деформационного процесса

Высокая концентрация пластической деформации в поверхностных слоях приводит к развитию полей напряжений, деформаций и скоростей смещений со сверхвысокими градиентными характеристиками. Это, в свою очередь, вызывает разрыхление и расслаивание материала на мезомасштабном уровне по плоскостям разрыва скоростей сдвига, а также образование границ раздела, параллельных плоскости трения. Каждый слой первоначально состоит из дендритов, ориентированных параллельно плоскости скольжения, а их степень упорядоченности носит градиентный характер, вектор которого направлен к плоскости скольжения. Образование таких границ представляет одну из форм самоорганизации мезоструктуры трибологического характера. Основными носителями деформации контактных поверхностей при трении (кроме традиционных дислокаций, дисклинаций и зернограницных сдвигов) являются смещения между слоями, разделенными границами раздела, параллельными плоскости трения, а также ротационные перемещения в местах разрыва адгезионных связей за счет касательных напряжений. Поворотная кинетика мезоструктур выполняет

Ким В. А., Каримов Ш. А.

ПРОЯВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ, ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ

функцию атомарной ротации при пластической деформации, сохраняя постоянство фактической площади контакта. Смещения, возникающие за счет двух последних носителей деформации, значительно превосходят параметр кристаллической решетки и носят не дислокационный и не дисклинационный характер, что указывает на мезомасштабность процесса.

По мере дальнейшего развития трибологического процесса происходит разбивка дендритной структуры и ее трансформация в ультрадисперсную поликристаллическую структуру. В верхних слоях, примыкающих к поверхности трения, процесс разбивки протекает более активно, а формирующиеся при этом ультрадисперсные зерна принимают относительно равноосную форму. На рис. 1 изображена поверхностная микроструктура, где видны плоскости сдвига и области расслоения, в которых начался процесс формирования ультрадисперсных зерен. В слоях, примыкающих к поверхности трения, измельчение зерен происходит более активно и в них просматриваются фрагменты микро- и мезоструктуры, из которых в дальнейшем могут возникать частицы износа.

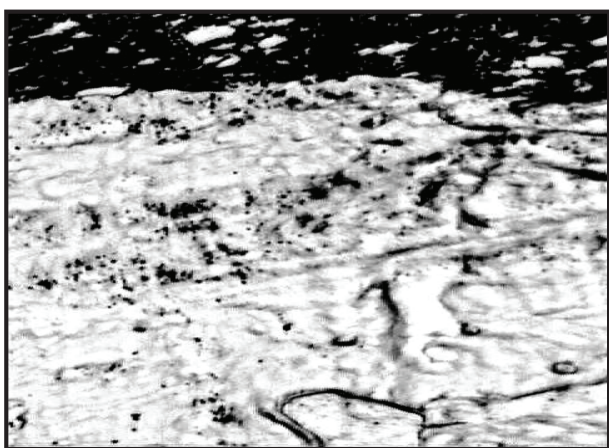


Рис. 1. Разбивка дендритной микроструктуры в поверхностных слоях колодки из стали 3 при трении по углеродистой стали У10 ($\times 1000$)

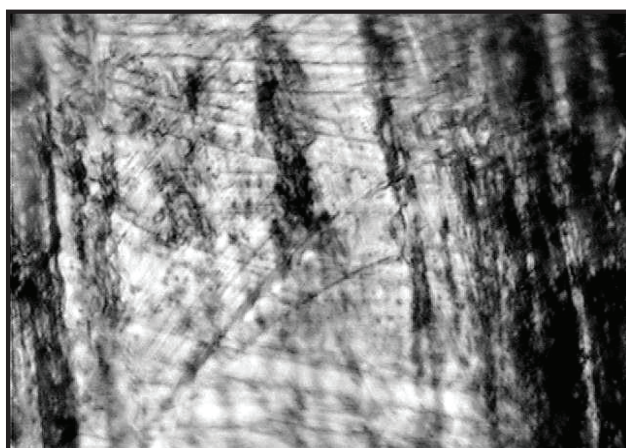


Рис. 2. Микротрещины, перпендикулярные вектору скорости скольжения на поверхности трения медного диска ($\times 400$)

Высокая диффузионная и химическая активность ультрадисперсной структуры приводит к сложному взаимодействию ее с окружающей средой, в результате формируется структура, сильно отличающаяся по химическому составу от исходной структуры. Слой, состоящий из ультрадисперсной структуры, имеет относительно однородную эпюру распределения химического потенциала по толщине и резкую границу раздела с подложкой. С ее появлением можно считать завершенным процесс приработки, потому что дальнейшее развитие фрикционного процесса приводит к образованию элементарных носителей разрушения материала.

Границы раздела ультрадисперсной структуры отличаются высокой развитостью. Учитывая, что любые границы раздела имеют более высокую подвижность по сравнению с другими структурными составляющими, в них происходит локализация носителей пластической деформации и источников диссипации мезомасштабного уровня. Это означает, что с повышением развитости границ раздела зерен и фаз износостойкость материала должна возрастать. С другой стороны, границы раздела состоят из структур с напряженными или неуравновешенными атомарными связями, которые сами по себе являются концентраторами напряжений и способствуют образованию носителей разрушения микро- и мезомасштабного уровня. При выходе носителей разрушения на макроуровень происходит формирование частиц износа, вскрытие и обновление поверхностей трения.

Установившееся изнашивание можно трактовать как распределенный во времени процесс бифуркации, состоящий из последовательного чередования разрушения, приводя-

щего к обновлению поверхности трения, и вовлечения вновь вскрытых ювенильных поверхностей в диссипативный режим. Интенсивность изнашивания определяется соотношением активностей этих двух процессов.

Разрыв адгезионных связей за счет касательных напряжений, параллельных вектору скорости скольжения, способствует образованию поверхностных микротрещин впереди и позади зоны схватывания. Микротрещины, образованные позади зоны схватывания, ориентируются преимущественно перпендикулярно скорости скольжения, так как формируются за счет растяжения слоев верхних уровней. Микротрещины, возникающие впереди зоны схватывания, ориентируются преимущественно под углом $\pi/4$ к вектору скорости скольжения, так как причиной их появления является сжатие поверхностных слоев. Примеры таких микротрещин представлены на рис. 2, 3.

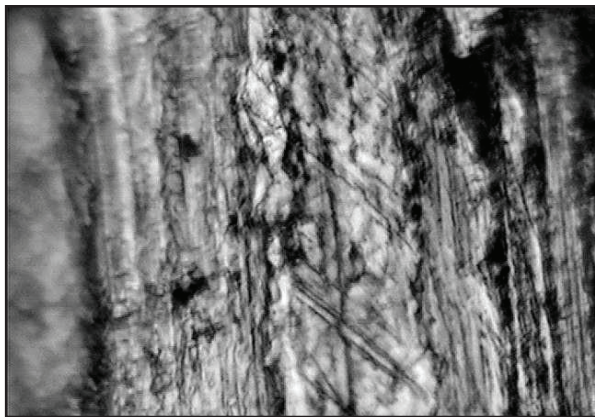


Рис. 3. Поверхностные микротрещины под углом $\pi/4$ к вектору скорости скольжения ($\times 400$)

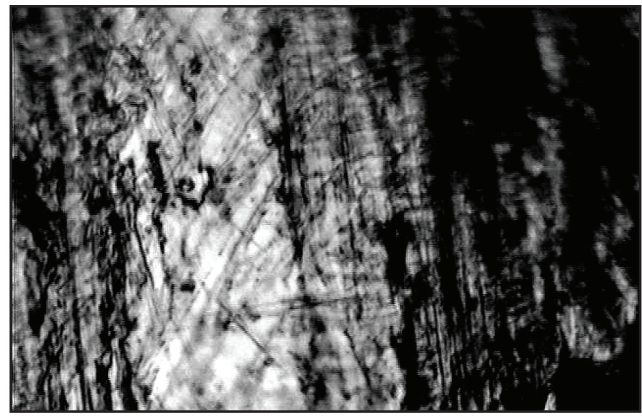


Рис. 4. Микротрещины на поверхности трения медной колодки ($\times 400$)

Расположение микротрещин носит упорядоченный характер, при этом они чередуются с полосами углубления, аналогичными шейке локализованной деформации при растяжении. Микротрещины состоят из коротких «берегов», а локализованные полосы растягивающих деформаций пронизывают всю «дорожку» скольжения.

Поля напряжений на поверхности трения носят периодический характер и приводят к образованию рельефа типа «шахматной доски», а возникающие при этом поверхностные микротрещины создают напоминающий протектор автомобильной шины сетчатый рисунок из наложенных друг на друга ортогональных и наклонных (под углом, близким к $\pi/4$) относительно вектора скорости скольжения рисок (см. рис. 4).

Если граница расслоения близка к поверхности трения, то могут образовываться микротрещины под поверхностью трения за счет «наползания» одного слоя на другой. В этом случае велика вероятность образования микротрещин или пор в глубине от плоскости трения. На рис. 5 представлена поверхность трения, на которой видны следы смещения и «наползания» слоев, а на рис. 6 показана микроструктура подповерхностного слоя, где просматриваются зоны смещения и образования микропор и трещин.

Поверхность трения, покрытая микротрещинами, представляет собой самостоятельную диссипативную структуру трибологического характера, выполняющую активную роль в рассеивании механической энергии.

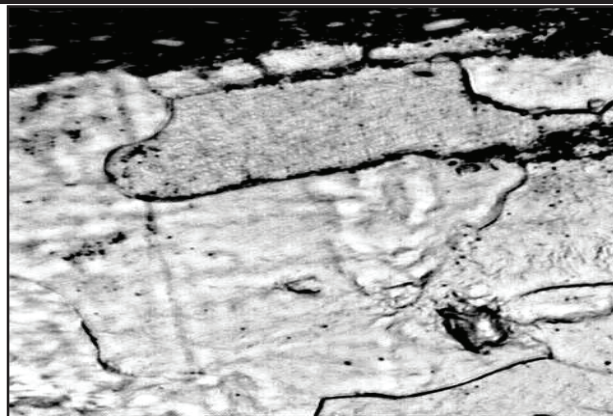


Рис. 5. «Наползание» фрагментированного слоя на поверхности трения медного диска ($\times 100$)

Рис. 6. Микроструктура подповерхностного слоя колодки из стали 3 после трения по стали У10 ($\times 1000$)

Поверхностное разрушение при трении (изнашивание) представляет форму диссипации энергии контактного взаимодействия, завершающую процесс пластической деформации поверхностных структур, самосогласованного образования и развития концентраторов напряжений микро-, мезо- и макромасштабных уровней. Изнашивание является комплексным процессом, отличающимся многообразием механизмов разрушения, комбинация которых и их активность зависят от режимов контактного взаимодействия. Уравнение диссипации энергии U при изнашивании можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -A \operatorname{div} \left(\overline{J} \right) \sigma T + \left(\sigma_A \Delta^D + \mu \overline{v}_i \right), \quad (1)$$

где A – коэффициент переноса; J – поток дефектов кристаллического строения; σ – скорость производства энтропии; T – температура процесса; σ_A – удельное поверхностное натяжение; Δ – средний приведенный размер частицы износа; D – фрактальный размер частицы износа; μ – химический потенциал; v_i – скорость массового износа.

Уравнение (1) отражает динамику развития всех носителей пластической деформации, участвующих в формировании потока дефектов кристаллического строения, и учитывает форму частиц износа, индивидуальную для каждого механизма разрушения.

Процесс механического истирания является завершающей стадией большинства механизмов изнашивания, а образование продуктов износа происходит главным образом за счет ротационных смещений материала в зонах разрыва скоростей скольжения. Рассмотрим этот процесс в идеализированном виде при трении без смазочного материала. Первоначально пластическая деформация локализуется в области, примыкающей к поверхности трения. Затем пластическое течение интенсивно развивается в приповерхностном слое, вызывая мезофрагментацию материала и развитие турбулентного слоя. Образование элементов турбулентного слоя представляет завершающую стадию единого процесса мезофрагментации и проходит несколько ступеней своего развития.

В зонах поверхностных концентраторов напряжений образуются микротрещины, в которые стекаются потоки дефектов кристаллического строения, приводящие к расклиниванию и дальнейшему росту макродефекта. Микротрещины повышают дискретность контакта, а при наличии защитного покрытия – его «островковость». Дискретность контакта усиливается за счет пластического смещения и наползания друг на друга отдельных островковых фрагментов [4].

Образование микротрещин в зоне адгезионного контакта и высокая степень фрагментации структуры поверхностного слоя приводят материал в этой локализованной области в

сложно-напряженное состояние, в котором наиболее активно проявляются поворотные моды тензора деформации. Функционирование поворотных мод можно рассматривать как очередную смену носителя пластической деформации, повышающую диссипативную активность поверхностных вторичных структур и снижающую фрикционную напряженность контакта. Развитие поворотных мод происходит за счет моментов от тангенциальных сил схватывания, ориентированных параллельно направлению скольжения, и градиента напряжения внутреннего трения в поверхностных слоях. Этот процесс схематично представлен на рис. 7, где отмечены зоны схватывания, направление скольжения $V_{ск}$ и направление поворотных мод. В результате трещина, расположенная на рисунке слева, раскрывается, вынося в зону трения новую поверхность, а трещина справа стягивается и уносит в глубь материала часть поверхности трения. Таким образом, происходит образование фрагментированного поворотного элемента и атомарная ротация.

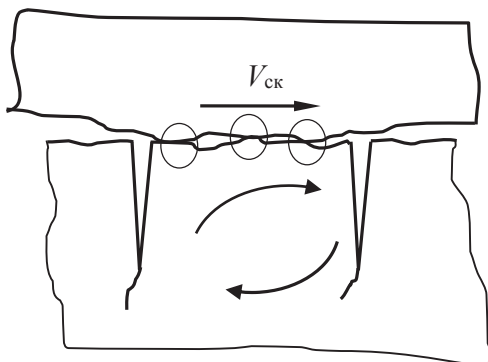


Рис. 7. Схема образования турбулентного фрагмента (валика)

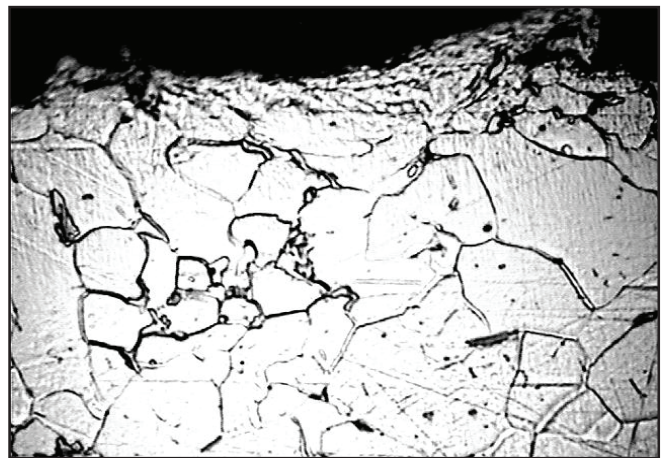


Рис. 8. Поверхность трения образца из стали 20 в момент образования «валика» ($\times 1000$)

Деформационный процесс инициирует диффузионный поток, направленный параллельно потоку дефектов кристаллического строения. В результате происходит ощутимое снижение концентрации легирующих компонентов на некоторой глубине от плоскости трения и разупрочнение этого слоя. Наличие такого слоя активизирует процесс турбулизации.

Если уровень контактных нагрузок ниже предела прочности на сжатие, то завершением этого процесса является формирование частиц износа игольчатой формы. В теории изнашивания их называют молями [5; 8]. На рис. 8 представлен момент образования «валика» на поверхности трения образца из стали 20. На микрофотографии видны фрагментированные структуры, микротрещина впереди «валика», ротационно-трансляционные вихри и результат зернограницного смещения.

В случае высоких контактных нагрузок, превышающих предел прочности на сжатие, образующиеся фрагменты износа претерпевают многократную пластическую деформацию, дополнительную фрагментацию и активное вторичное взаимодействие с поверхностью трения. Частицы износа могут размазываться по поверхности трения, образуя вторичную структуру слоисто-композиционной архитектуры. Частицы износа в этом случае могут принимать различные размеры и формы от чешуйчатого до игольчатого вида, а их структура и химический состав будут значительно отличаться от исходного материала. После разрушения и уноса фрагментированного слоя процесс повторяется на вновь обновленном приповерхностном уровне.

Деформационное упрочнение при трении формирует в поверхностных слоях положительный градиент механических свойств за счет развития остаточных сжимающих внутренних напряжений, которые стабилизируют рост микротрещин и повышают их устойчивость.

Ким В. А., Каримов Ш. А.

ПРОЯВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ, ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ

Поток диффузантов из глубинных слоев приводит к снижению потока дефектов кристаллического строения, что также способствует стабилизации микротрещин.

Заключение

Пластическая деформация при трении локализуется в поверхностном слое и вызывает упорядоченную фрагментацию структуры, развитие концентраторов напряжений разных масштабных уровней, выполняющих роль бифуркационных центров, которые в дальнейшем становятся или диссипативными стоками, или очагами разрушения материала.

Образование продуктов износа происходит за счет ротационных смещений мезослоев материала в зонах разрыва скоростей скольжения, при этом сам процесс изнашивания можно рассматривать как активный диссипативный процесс, отводящий энергетический поток из зоны трения за счет потока вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Болехонов, А. В. Болеста, В. Е. Панин [и др.]; под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
2. Галахов, М. А. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения / М. А. Галахов, П. П. Усов. – М.: Наука, 1990. – 280 с.
3. Ким, В. А. Влияние пластической деформации при резании металлов на микроструктуру поверхностного слоя / В. А. Ким, Т. А. Отряскина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1(2). – С. 81-87.
4. Ким, В. А. Роль износостойких покрытий в контактных процессах трения и изнашивания / В. А. Ким, Ш. А. Каримов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV-1(4). – С. 54-60.
5. Макушок, Е. М. Массоперенос в процессах трения / Е. М. Макушок, Т. В. Калиновская, А. В. Белый. – Минск: Наука и техника, 1978. – 272 с.
6. Мур, Д. Основы и применение трибоники / Д. Мур; пер. с англ. С. А. Харламова; под ред. И. В. Крагельского. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
7. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики / В. Е. Панин, А. В. Колубаев, А. И. Слосман [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2000. – № 1. – С. 67-74.
8. Справочник по трибонике. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
9. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
10. Чихос, Х. Системный анализ в трибонике / Х. Чихос; пер. с англ. С. А. Харламова. – М.: Изд-во «Мир», 1982. – 344 с.

Верхотуров А. Д., Воронов Б. А., Макиенко В. М., Коневцов Л. А.

Anatoly D. Verhoturov, Boris A. Voronov, Victor M. Makienko, Leonid A. Konevtsov

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ МАТЕРИАЛОГИЯ: 1. НАУЧНАЯ БАЗА СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДВ РЕГИОНА В УСЛОВИЯХ ЕГО УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

MINERALS&MATERIALS SCIENCE, PART 1: MMS – A THEORETICAL FRAMEWORK FOR CREATION OF NEW COMPOSITE MATERIALS USING THE MINERAL RAWES EXTRACTED IN THE FAR EASTERN REGION IN THE CONTEXT OF ITS SUSTAINABLE DEVELOPMENT



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

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



Воронов Борис Александрович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, директор Института водных и экологических проблем ДВО РАН, (Россия, Хабаровск). E-mail: ivep@ivep.as.khb.ru.

Mr. Boris A. Voronov – corresponding member of the Russian academy of Sciences, Doctor of Biology, Professor, director of the Institute of Water and Environmental Problems, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, city of Khabarovsk). E-mail: ivep@ivep.as.khb.ru.



Макиенко Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология металлов» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru.

Mr. Viktor M. Makienko – Doctor of of Engineering, Professor, the Far Eastern State University of Transport (Russia, city of Khabarovsk). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru.



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

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

Аннотация. В работе показано, что развитие науки о материалах, комплексный подход, обозначили необходимость создания нового раздела – минералогической материаловедения (ММ). В связи с этим целью данной работы являлось обоснование нового раздела науки о материалах – ММ, теоретической базы создания композиционных материалов и изделий из МС в условиях устойчивого развития ДВ.

Summary. In this paper we demonstrate that the development of materials science, along with the holistic approach, have undoubtedly designated a necessity for establishing a new sub discipline – minerals and materials science (MMS). In this connection, we try to substantiate a new sub discipline of materials science – the MMS, a theoretical basis for creation of new composite materials and products in the Far Eastern Region of Russia in the context of its sustainable development.

Ключевые слова: наука о материалах, получение материалов, устойчивое развитие, экология.

Key words: materials science, production of materials, sustainable development, environmental science.

УДК 621.791-03

Введение

Известно, что Правительство России уделяет значительное внимание Дальневосточному региону и предполагает обеспечить поддержку дальнейшему его развитию [1]. При этом разрабатываются, утверждаются Программы развития с участием известных специалистов, в том числе учёных ДВ региона, где основной идеей становится дальнейшее его развитие: “по сути, речь должна идти о создании на Дальнем Востоке динамического промышленно-транспортного комплекса на основе использования прогрессивных технологий переработки сырья и высокотехнологичных видов деятельности” [2]. Как показано в [2; 3], дальнейшее развитие ДВ должно основываться, прежде всего, на использовании прогрессивных технологий переработки сырья и высокотехнологичных видов деятельности. При этом в работах обозначена целевая область концепции, состоящая из двух уровней, цели первого уровня состоят из двух разделов (см. табл. 1).

Таблица 1

Схема двух уровней целевой области концепции [1]

Цели первого уровня		
1. Прогрессивные технологии переработки сырья		2. Высокотехнологичные виды деятельности
Создание комплексов высокотехнологичных производств переработки сырья		Создание промышленных кластеров
регионального	транзитного	

Предполагается для выполнения этих разделов использовать “новую индустриализацию” [2; 3]. Авторы поясняют значение термина “новая индустриализация”: “... воссоздание промышленной структуры, ориентированной на кооперационные взаимодействия с внутренними и внешними агентами, опираясь на эксплуатацию сырьевых ресурсов, так и на новые, в том числе наукоёмкие виды деятельности и продукты” [3, 271].

На наш взгляд, такое определение скорее связано с внедрением организационных мероприятий, а не новых технологий XXI века. Оно не предполагает непосредственной взаимосвязи целей первого уровня и скорее направлено не на развитие прогрессивных технологий переработки сырья и высокотехнологичных видов деятельности для производства материальных благ в интересах устойчивого развития ДВ региона, а на извлечение прибыли внешними и внутренними экономическими агентами.

В нашей работе рассматриваются вопросы, связанные с новым подходом к формулировке целей первого уровня – осуществлению и развитию “прогрессивных технологий переработки сырья” и “высокотехнологичных видов деятельности”.

Представленные цели первого уровня и определение “новой индустриализации” – это только первый шаг к разработанной политиками и экономистами проблеме дальнейшего развития нашего мегарайона. Далее для реализации целей необходимы комплексная научная проработка проблемы, дополнения специалистами других специальностей – геологами, горняками, металлургами, материаловедом, экологами. Следует заметить, ещё В. И. Вернадский, 150-летие которого мы отмечаем в 2013 г., писал, что возникшие насущные задачи надо решать не по отдельным наукам, а по проблемам. А проблема устойчивого развития ДВ региона является первостепенной не только для его жителей, но и всей страны и представляет научный и практический интерес.

В связи с этим, с точки зрения материаловедов и экологов, первый раздел целей первого уровня не отвечает решению проблемы устойчивого развития региона, так как конечной целью является использование прогрессивных технологий в пользу внутренних и внешних агентов. То есть ДВ регион остаётся с сырьевой экономикой, остаётся сырьевым придатком других регионов страны и зарубежных стран. Кроме того, два раздела первого уровня практически не взаимосвязаны.

Нами предлагается новая идея первого раздела первого уровня – превращение ДВ региона из поставщика сырья в поставщика материалов, изделий, продуктов, новых технологий, инноваций (см. рис. 1).

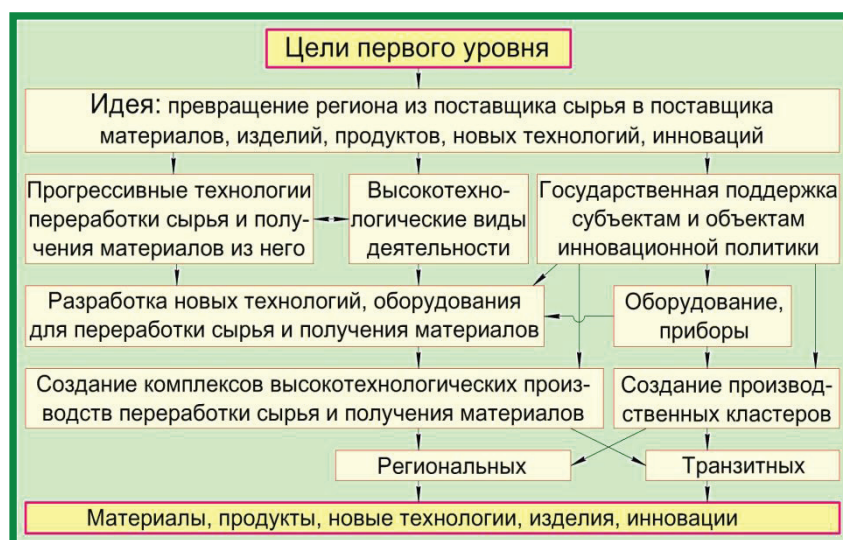


Рис. 1. Схема содержания проблемы и реализации целей 1-го уровня целевого поля

Новое определение “новой индустриализации” в условиях развития ДВ должно определять получение материалов и изделий из МС в регионе его добычи с использованием оборудования и технологий, обеспечивающих комплексную и рациональную переработку в экологически приемлемых условиях, исключающих использование энергозатратных, экологически опасных химических, пиро-, гидрометаллургических производств. Стратегия не только в использовании новых технологий переработки сырья, но и в получении из него материалов с использованием, прежде всего, в интересах развития ДВ. Кроме того, это означает создание малых предприятий по получению материалов в регионе его добычи и применение новейших технологий. Это сложнейшая научно-практическая задача, требующая комплексного подхода к её решению различными специалистами.

Современные отечественные металлургия и материаловедение не в состоянии решить проблему получения материалов из МС в регионе его добычи в условиях устойчивого развития: металлургия – потому что преимущественно ориентирована на громоздкое, объёмное пиро-, гидрометаллургическое производство, а материаловедение – не рассматривает в качестве объекта исследования МС и отходы. В развитых же странах наука о материалах выходит

к новой ступени развития – появилось “интеграционное материаловедение”, которое приближает нас к решению поставленных задач, и которое более 10 лет представлено в учебниках Германии [4]. Суть его в комплексном рассмотрении движения сырья, материалов, изделий в циклическом круговороте вещества и материалов во “второй природе” (ЦКВМ). Анализ движения вещества и материалов показал, что у науки о материалах появился новый объект исследования – отходы, и они являются важнейшим объектом исследования в развитых странах (Германия, Швеция, Япония и др.). В результате Германия достигла выдающихся успехов в переработке сырья, промышленных и бытовых отходов (см. табл. 2).

Таблица 2

Коэффициент применения утилизированных отходов в Германии

Материалы из вторичных ресурсов	Коэффициент применения утилизированных отходов
Сталь	45 %
Медь	53 %
Алюминий	61 %
Свинец	69 %
Бумага	95-98 %

В условиях ДВ региона актуальным является уяснение и формулировка нового стратегического направления развития промышленного производства материалов, основанного на сырьевой базе в условиях его устойчивого развития, а также разработка методологической и физико-химической основы переработки сырья с использованием нового подхода – “новой индустриализации”.

Комплексный подход к решению проблемы, разработка новых целей и задач, обозначили перед наукой о материалах необходимость создания нового раздела – минералогической материаловедения (ММ). В связи с этим целью данной работы являлось обоснование нового раздела науки о материалах – ММ, теоретической базы создания композиционных материалов и изделий из МС в условиях устойчивого развития ДВ.

Методологические основы и основные принципы ММ

Общеизвестна необходимость дальнейшего ускоренного развития ДВ [1]. Известен ряд подходов к решению этой проблемы [5; 6]. Основываясь на анализе этих работ, мы предлагаем новую стратегию развития региона – превращение ДВ в поставщика не сырья, а материалов, изделий, высокотехнологичной продукции. Началом нового подхода является обоснование и использование нового раздела науки о материалах – ММ, важнейшим направлением которого является изучение высокотехнологичных методов переработки МС для получения материалов и изделий в условиях ресурсодобывающих регионов. Потребности превращения ДВ региона из поставщика сырья в поставщика материалов и изделий давно поставили перед наукой задачи о необходимости переработки МС в регионе его добычи с использованием новых технологий, обеспечивающих устойчивое развитие.

Предлагается гипотеза, сущностью которой является использование концентрированных потоков энергии и методов порошковой металлургии для получения материалов и изделий без применения экологически опасных, энергозатратных методов, требующих громадных капитальных вложений (пиро-, гидрометаллургических, химических).

Разработка методологии получения материалов из МС требует, во-первых, комплексного подхода с учётом достижений геологии, горного дела, металлургии, химии, материаловедения, технологии материалов, экологии, во-вторых, она должна быть основана на научных принципах последовательного развития парадигмы науки о материалах [6].

Получение материалов из МС должно соответствовать критериям ММ. В связи с предложенным определением “новой индустриализации” необходима разработка её теоретических основ, которые должны базироваться на достижениях науки о материалах.

Как уже указывалось, наука о материалах находится в стадии изменения и совершенствования в связи с изменением, появлением новых объектов исследования и необходимостью соблюдения экологических требований при производстве материалов. В связи с этим появление нового объекта исследования при получении материалов, отходов, способствовало появлению “интеграционного материаловедения”. Появились новые объекты исследования – минеральное и растительное сырьё, что способствовало появлению новой науки о материалах – материалогии и её раздела – энтропийно-экологической материалогии (см. рис. 2). Далее, в связи с потребностями развития ресурсодобывающих регионов, превращения ДВ региона из поставщика сырья в поставщика материалов и изделий, а также необходимостью развития высокотехнологичных методов переработки МС для получения материалов и изделий, появилась необходимость обозначить новый подраздел науки о материалах – ММ. На появление и развитие ММ в значительной степени оказывает влияние потребность изучения и получения материалов из МС и растительного сырья, а также из производственных и других отходов в условиях устойчивого развития ДВ, с учётом изменения состава, структуры, свойств МС и получаемых материалов, изменения энтропии и ЦКВМ. Таким образом, в структуре материалогии ММ заняла своё место (см. рис. 2). ММ изучает создание материалов с заданными свойствами из МС в регионе его добычи на основе рационального выбора МС, высокотехнологичной переработки с использованием концентрированных потоков энергии и методов порошковой металлургии.



Рис. 2. Структура материалогии и главные задачи основных направлений развития науки о материалах

Следует отметить, что в соответствии с выводами доктор технических наук Я. Д. Вишнякова, производство материалов приносит наибольшее влияние в нарушение экологической обстановки на Земле и требует изменения парадигмы развития человеческого общества. В свою очередь, на развитие науки о материалах и становление материалогии оказало значительное влияние появление новых технологий получения материалов: плазменного метода, алюминотермии, электрошлакового переплава, воздействие дугового разряда, СВС-метода, методов порошковой металлургии, некоторые из которых использовались в данной нашей работе.

Кроме того, в настоящее время одним из основных принципов науки о материалах является изучение ЦКВМ, которое стало обязательным для материаловедов развитых стран [4]. Общий ЦКВМ условно подразделён на 4 этапа: сырьевой (“дуга Ломоносова”), промышленный, эксплуатационный и экологический. Сырьевой этап включает в себя цепочку связей комплексного подхода получения материалов из МС, состоит последовательно из основных циклов: геология→горное дело→получение материала→материалогия→химия→металлургия→материаловедение→экология. Экологический, доминирующий на обозначенных этапах, в

действительности связан через цикл сбора и переработки отходов – со всеми другими звеньями ЦКВМ, и чётко обозначенных границ между этапами нет.

Анализ последовательности преобразования вещества и материалов на сырьевом этапе ЦКВМ (см. рис. 3) показывает, что он является базой комплексного подхода получения материалов из МС.

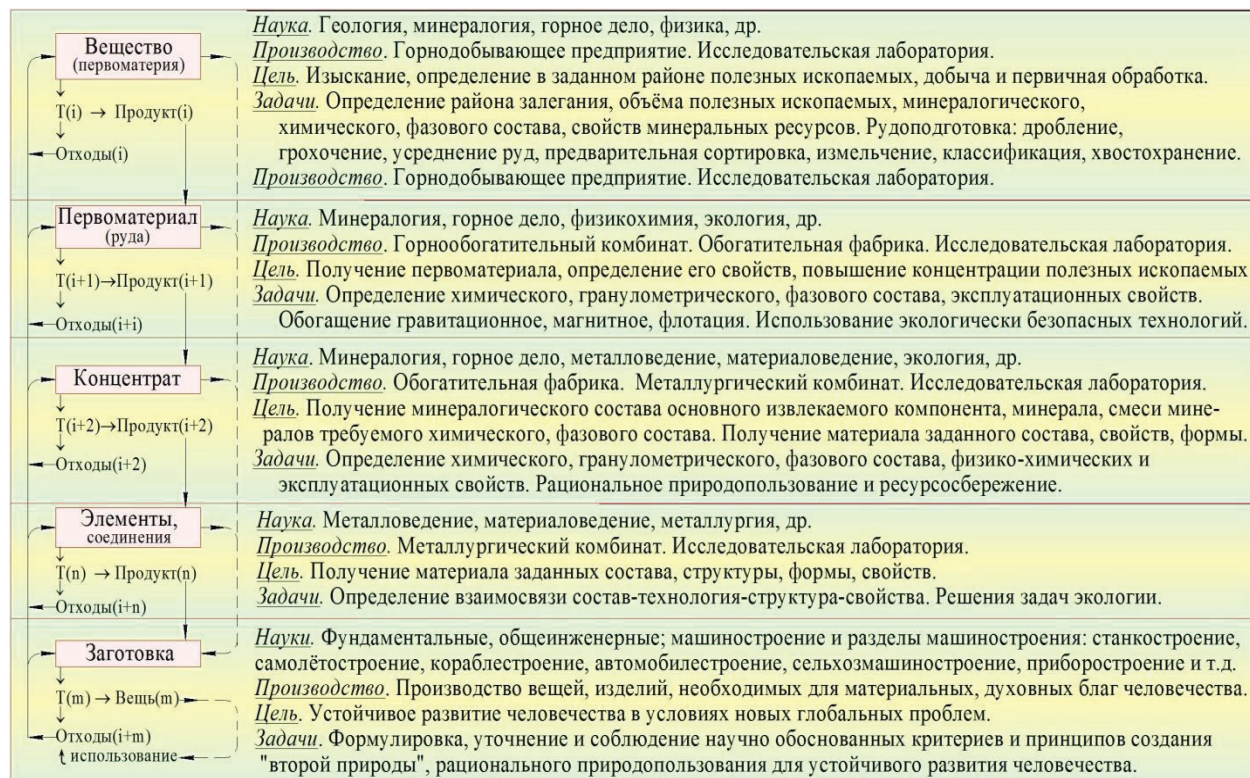


Рис. 3. Схема изучения, преобразования и использования МС на сырьевом этапе ЦКВМ

Схема изучения, преобразования и использования МС на сырьевом этапе ЦКВМ отражает последовательность применения технологий от T_i до T_n, T_m (см. рис. 3).

На основании изучения “движения” вещества и материалов на сырьевом этапе ЦКВМ и эволюции парадигмы (модели) недропользования [6] (см. табл. 3) была разработана общая методологическая схема (см. табл. 4) ММ – получения материалов из МС ресурсодобывающего региона с использованием концентрированных потоков энергии с обозначенными позициями последовательности (1-11) в условиях его устойчивого развития.

Основы материалогии и её составляющих звеньев, в том числе ММ, зарождались в процессе становления минералогии, кристаллографии, кристаллохимии, материаловедения, и представляют собой последовательное развитие парадигм (см. табл. 3), которые не отрицают предыдущие, а дополняют их. Первые парадигмы, предложенные на основе работ великих русских учёных (В. И. Вернадского, А. Е. Ферсмана, И. П. Бардина, Э. В. Брицке и др.), связаны с получением и обработкой МС.

Таблица 3

Эволюция парадигмы (модели) недропользования [6]

Авторы моделей	Краткое описание сущности
1. Вернадский В.И	Рециркуляция металлов и неметаллических полупродуктов, создание сплавов и материалов с учётом не только свойств, но и распространённости элементов в природе (на основе Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti). Рациональное сознательное преобразование биосферы в “ноосферу”, сосуществование общества в гармонии с природой



Авторы моделей	Краткое описание сущности
2. Ферсман А.Е.	Полное использование всех ценных компонентов минерального сырья, создание комбинированных межотраслевых производств, в которых технологические процессы подбираются к составу сырья
3. Бардин И.П.	Отходы одних технологических переделов минерального сырья или производств должны служить сырьём для других
4. Брицке Э.В.	Технология производства материалов сосуществует с окружающей средой, когда используется принцип комплексного использования сырья
5. Мельников Н.В., Агошков М.И.	Комплексное освоение недр: достижение оптимальных для народного хозяйства страны и интересов будущих поколений показателей полноты использования всех видов ресурсов, недр и участвующих в процессе их освоения трудовых и материальных ресурсов
6. Резниченко В.А.	Организация замкнутого комплексного производства: создание межотраслевых технологически замкнутых производств в рамках предприятий, месторождений, регионов, отраслей; рециркуляция материалов; разработка материалов с учётом распространённости элементов в природе, сохранение окружающей среды
7. Верхотуров А.Д.	Создание мини-заводов в местах добычи сырья с использованием высоких технологий. Идеальной схемой безотходного производства, ориентиром на будущие технологии должна быть разомкнутая от биосферы схема ЦКВМ, т.е. схема производства с полной переработкой отходов
8. Верхотуров А.Д.	Разложение минералов, их восстановление и получение элементов, сплавов и соединений при воздействии на минералы (МС) концентрированных потоков энергии (высоких градиентных температур и давлений) в условиях лазерной, электронно-лучевой, электроискровой, электрошлаковой, плазменной обработки, алюминотермии, экстремальных методов порошковой металлургии, а не пиро- и гидрометаллургические процессы
9. Трубецкой К.Н., Чантурия В.А.	Развитие минерально-сырьевого комплекса как составной части процесса устойчивого развития при сохранении естественной биоты Земли путём создания эко-, геотехнологий освоения недр на принципах поточности, малоотходности, ресурсосбережения, ресурсовоспроизведения, повышения контрастности свойств разделяемых компонентов с обеспечением экологической чистоты

Учёт парадигм в становлении и развитии ММ является первым принципом ММ, в силу того, что ММ является продолжением развития и подразделом науки о материалах. Целью ММ является изучение и создание материалов с заданными свойствами из МС в регионе его добычи на основе рационального выбора МС, высокотехнологической переработки с использованием концентрированных потоков энергии, методов порошковой металлургии. Кроме того, вторым исходным положением ММ является необходимость изучения последовательного ЦКВМ на его “сырьевом” этапе (см. рис. 3).

Научной основой ММ является исследование начального этапа ЦКВМ, анализ которого показывает, что эффективность производства материалов в условиях устойчивого развития повышается при минимальном расстоянии (времени) между циклами и расстоянии (продолжительности) каждого цикла в отдельности, что соответствует минимальному повышению энтропии. В связи с этим можно сделать вывод о необходимости переработки МС и получении материалов в регионе его добычи с использованием высоких технологий (плазменной, методов порошковой металлургии, металлотермии, электрошлакового переплава и т.д.), обеспечивающих рациональную, комплексную переработку. В предлагаемой работе мы преимущественно использовали металлотермию, электрошлаковый переплав, методы порошковой металлургии.

Методологическая схема получения материалов из МС
 ресурсодобывающего региона

1	Проблема комплексного, рационального получения материалов, продуктов из природного сырья в условиях устойчивого развития ресурсодобывающего региона		
2	Анализ данных по устойчивому развитию ресурсодобывающего региона, анализ геологических данных, экологической обстановки		
3	Формирование идеи и стратегии развития ресурсодобывающего региона		
4	Анализ данных по развитию технологий переработки МС, тенденций развития науки о материалах		
5	Исследование ЦКВМ на сырьевом этапе		
6	Предложение гипотез по решению идеи и стратегии развития ресурсодобывающего региона в условиях устойчивого развития		
	А	Б	В
	Сокращение расстояний (времени) между циклами ЦКВМ	Получение материалов при воздействии концентрированных потоков энергии на МС	Получение материалов в плазменном котле при глубокой переработке МС
7	Исследование минерально-сырьевой базы и выбор сырья для получения материалов		
8	Уточнение методологии получения материалов по выбранному МС и методу переработки		
9	Модельные эксперименты. Экспериментальные исследования по получению материалов при выбранных методах обработки выбранного МС		
10	Исследование состава, структуры и свойств полученных материалов		
11	Выводы		

Основная гипотеза данной работы заключалась в предположении, что при действии концентрированных потоков энергии, в том числе дугового разряда на МС (с восстановителем или без него), МС может быть полностью или частично восстановлено с образованием металлов и далее изделий (промышленных продуктов). Сущность гипотезы в том, что при действии дугового разряда и тепловых потоков на металлы, происходит “вскрытие” концентратов, частичное или полное восстановление оксидов металлов, удаление летучих оксидов, что позволяет получать необходимые элементы и соединения. Использование восстановителей позволяет получать соединения, в том числе тугоплавкие карбиды, бориды, нитриды, силициды переходных металлов.

Для выбора состава, структуры, свойств шихты, технологии её использования, а также разработки теории восстановления многокомпонентных оксидных систем при действии на них концентрированных потоков энергии гипотезой служит предположение, что при воздействии дуговых разрядов будет происходить процесс изменения состава, структуры и свойств концентратов. В связи с этим необходимы предварительные исследования, в том числе проведение модельных исследований. При этом последовательное и комплексное исследование и анализ циклического изменения фазового, химического состава, структуры и свойств вещества является методологической основой ММ. Кроме того, анализ изменения вещества и энергетических затрат позволяет оценить изменение энтропии при выполнении каждого цикла, определить направление устойчивого развития.

На основании анализа основных принципов ММ, эволюции парадигм (см. табл. 3), ЦКВМ и его сырьевого этапа (см. рис. 3), методологической схемы получения материалов из МС ресурсодобывающего региона (см. табл. 4) разработана упрощённая схема методологии ММ для получения материалов в регионе добычи МС с использованием концентрированных потоков энергии (см. рис. 4).



Рис. 4. Упрощённая методологическая схема ММ для получения материалов из МС в условиях устойчивого развития ресурсодобывающих регионов

Важнейшим разделом этой методологии является исследование изменения состава, структуры и свойств МС и материалов при действии концентрированных потоков энергии, в т.ч. модельные исследования для разработки физико-химических основ получения материалов из МС в регионе его добычи. Данная методология была нами использована при создании новых композиционных материалов из МС ДВ региона в условиях его устойчивого развития.

Таким образом, в настоящее время для получения материалов в большинстве случаев переработку МС осуществляют на крупных металлургических, химических предприятиях, которые располагаются, как правило, в Западных регионах страны. Тем не менее решение проблемы получения материалов в ДВ регионе возможно при создании предприятий, в том числе малых предприятий, использующих высокотехнологичное оборудование. В связи с этим одной из основных проблем ресурсодобывающего региона является превращение его из поставщика сырья в поставщика материалов и изделий. При этом стратегическим направлением развития науки о материалах является изучение, исследование и получение материалов с использованием концентрированных потоков энергии (плазменных, и т.д.) [5, 6]. Это направление предполагает комплексный подход к решению проблемы на базе нового раздела науки о материалах – ММ – теоретической базы получения материалов из МС в регионе его добычи и в условиях устойчивого развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заседание президиума Государственного Совета по вопросам развития Дальнего Востока, Забайкалья 29 ноября 2012. Московская область, Ново-Огарёво. Интернет-ресурс: tv.24/news/economic/220972.
2. Синтез научно-технических и экономических прогнозов: Тихоокеанская Россия-2050 / ред. акад. П. А. Минакир, акад. В. И. Сергиенко. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 912 с.
3. Минакир, П. А. Региональная экономическая динамика. Дальний Восток / П. А. Минакир, О. М. Прокапало. – Хабаровск: Дальнаука, 2010. – 304 с.
4. Hornbogen E., Eggeler G., Werner E. Werkstoffe. Springer-varlag Berlin Heidelberg. 2012. – 486 p.
5. Новая парадигма развития России в 21 веке. Комплексные исследования проблем устойчивого развития: идеи и результаты / В. А. Коптюг, В. М. Матросов, В. И. Левашов. – М.: Academia, 2000. – 415 с.
6. Ларичкин, Ф. Д. Формирование концептуальной модели рационального недропользования / Ф. Д. Ларичкин // Ресурсы, технологии и экономика. – 2005. – № 3. – С. 11-18.
7. Верхотуров, А. Д. Материалогия / А. Д. Верхотуров // Вестник ДВО РАН. – 2004. – № 5. – С. 80-86.
6. Верхотуров, А. Д. Некоторые методические и экологические подходы, а также технологические аспекты устойчивого развития ресурсодобывающих регионов / А. Д. Верхотуров, В. М. Макиенко, А. Ф. Серенко, Л. А. Коневцов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № III-1(15). – С. 86-93.

Марьин Б. Н., Куделько А. Р., Куриный В. В., Черномас В. В., Шпорт В. И., Маценко В. В.
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОМД — РЕЗУЛЬТАТ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ КАФЕДР
ВУЗА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Марьин Б. Н., Куделько А. Р., Куриный В. В., Черномас В. В., Шпорт В. И., Маценко В. В.
Boris N. Maryin, Anatoly R. Kudelko, Vladislav V. Kuriny, Vadim V. Chernomas, Viacheslav I. Sport,
Viacheslav V. Matsenko

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОМД – РЕЗУЛЬТАТ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
БАЗОВЫХ КАФЕДР ВУЗА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**METAL FORMING TECHNOLOGY INTENSIFICATION AS A RESULT OF THE WORK
OF A UNIVERSITY’S “BRANCH ACADEMIC DEPARTMENTS” AT THE PREMISES
OF LEADING INDUSTRIAL ENTERPRISES**

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: maryinsb@mail.ru
Mr. Boris N. Maryin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina Pr. E-mail: maryinsb@mail.ru

Куделько Анатолий Романович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktoc@knastu.ru
Mr. Anatoly R. Kudelko – PhD in Engineering, Professor, Head of the Department of Innovation Projects and Processes Management (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina Pr. E-mail: ktoc@knastu.ru.

Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru
Mr. Vladislav V. Kurinij – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru

Черномас Вадим Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией проблем металлотехнологий в металлургии Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: mail@imim.ru.
Mr. Vadim V. Chernomas – Doctor of Engineering, Associate Professor, head of the Laboratory for New Metallurgy Technologies, Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Komsomolsk-on-Amur, 1, Metallurgists St. E-mail: mail@imim.ru.

Шпорт Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель сети базовых кафедр на Дальнем Востоке (Россия, Хабаровск). E-mail: main@adm.khv.ru.
Mr. Viacheslav I. Sport – Doctor of Engineering, Professor, Head of Research of the network of branch departments at industrial enterprises in the Far East of Russia (Russia, city of Khabarovsk). E-mail: main@adm.khv.ru.

Маценко Вячеслав Викторович – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1. E-mail: matsenkovv@mail.ru
Mr. Viacheslav V. Matsenko – PhD student, Institute for Machine Engineering and Metallurgy, the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Komsomolsk-on-Amur, 1, Metallurgists St. E-mail: matsenkovv@mail.ru.



Аннотация. На базовых кафедрах Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, созданных на ведущих предприятиях города, наряду с реализацией фрагментов учебного процесса проводятся научные работы по комплексной интенсификации технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД).

Summary. The branch academic departments of Komsomolsk-on-Amur State Technical University on the premises of the city's leading industrial enterprises, apart from offering certain academic courses, carry out research & development aimed at developing and improving metal forming technology processes.

Ключевые слова: базовые кафедры, образовательная деятельность, комплексная интенсификация, технологические процессы, обработка металлов давлением, научная деятельность.

Key words: branch academic departments, educational activity, comprehensive intensification, technology processes, metal forming, research and development.

УДК 629.73

На основе общепринятых положений в обработке металлов давлением (ОМД) под интенсификацией технологических процессов обычно понимают совокупность дополнительных, по сравнению с традиционными, мер или действий, позволяющих улучшить качество деталей, снизить трудоемкость изготовления продукции и сократить количество оборудования или технологической оснастки.

В настоящее время оформилось и нашло применение в практике несколько направлений интенсификации, а именно:

1. ОМД с дифференцированным нагревом и охлаждением. Дифференцированный нагрев и охлаждение дают возможность увеличить степень деформации в результате повышения пластичности материала и предотвратить возможную потерю устойчивости в зоне передачи усилия из-за уменьшения последнего.

2. Совмещённые способы ОМД, т.е. одновременно на одном оборудовании или штампе производят несколько операций.

3. ОМД в режиме сверхпластичности, когда заготовка нагревается до температур, превышающих температуру рекристаллизации, и деформируется с весьма малой скоростью порядка $10^{-2} \dots 10^{-4}$ 1/с.

4. Высокоскоростная ОМД (магнито-импульсная, электрогидравлическая, штамповка взрывом, ударная штамповка), при которой скорость деформирования достигает десятков и сотен метров в секунду.

5. ОМД с изменением условий на поверхности контакта заготовки и инструмента, при которой изменяют условия трения по заданному закону, в результате чего разгружаются опасные зоны заготовки.

6. ОМД с использованием эффекта электропластичности, при которой через заготовку пропускают кратковременные электрические импульсы большой интенсивности, результатом чего является залечивание микродефектов и дополнительное повышение пластичности из-за выделения тепла.

7. Формирование металлоизделий методами пластической деформации из металлов и сплавов, находящихся в твердотелом состоянии (тиксостамповка, жидкая штамповка) [1], включая совмещенные металлургические процессы литья и обработки металлов давлением (литейно-прокатные модули и агрегаты [2, 3], технологии литья-штамповки (автофорд-процесс) [4]).

В некоторых случаях весьма эффективным является одновременное применение нескольких способов интенсификации, например штамповка с дифференцированным нагревом и дополнительным нагружением.

Кроме того, правильная расстановка и расположение оборудования, оснастки, а также проведение НИОКР и организация образовательного процесса позволяют создать условия для комплексной интенсификации технологии.

Переход с 2011 г. на уровневую систему высшего профессионального образования с реализацией требований федеральных государственных образовательных стандартов к структуре, содержанию, условиям реализации и результатам подготовки выпускников вуза определяет необходимость совершенствования и развития сферы, форм и технологий участия работодателей в подготовке студентов, совместной деятельности вуза с хозяйствующими субъектами экономики, бизнеса, научной и социально-культурной сфер региона.

Результаты функционирования базовой кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ) «Комплексное кадровое обеспечение металлургического предприятия», созданной в 2011 г. на базе ОАО «Амурметалл» (г. Комсомольск-на-Амуре), показал, что в рамках совместной деятельности университета и предприятия в структуре базовой кафедры целесообразна реализация ряда компонентов научно-образовательного процесса, в частности к ним относятся:

- стажировка и дополнительное образование преподавателей и специалистов с целью согласования, подготовки и реализации перспективных научно-исследовательских, технологических и конструкторских направлений совместной деятельности;
- подготовка и издание учебных пособий, монографий, справочников, необходимых для реализации научно-образовательного процесса на базовой кафедре;
- чтение постановочных, проблемных, обзорных лекций по отдельным дисциплинам профессионального цикла ведущими специалистами предприятий;
- реализация отдельных компонентов рабочих учебных планов образовательных программ, связанных с курсовым и дипломным проектированием по тематике предприятия, проведение лабораторно-практических занятий по отдельным специальным дисциплинам, всех видов практик и других составляющих;
- участие в научных семинарах, научно-технических конференциях, симпозиумах, конгрессах, в том числе и международных;
- оформление и подача заявок на объекты интеллектуальной собственности;
- проведение совместных прикладных научно-исследовательских разработок, направленных на разрешение существующих, выявленных проблем, на интенсификацию реализуемых на предприятии технологических процессов, на основе которых осуществляется подготовка и защита магистерских, кандидатских и докторских диссертаций.

При этом следует отметить, что в части последнего компонента перечисленных направлений совместной деятельности КнАГТУ и предприятий края достигнуты представленные ниже отдельные результаты научно-исследовательской деятельности.

К ним относятся:

1. Исследование и интенсификация технологии производства арматуры для железобетонных изделий [5; 8].

Рассмотрено влияние скорости деформирования, силовой и термической интенсификации на структуру и свойства арматуры из стали марки 25Г2С при одноручьевой и двухручевой прокатке на мелкосортном стане 320/150.

Значение металлургии в развитии промышленности и строительства в частности огромно. Особенно это актуально при реализации проектов, где применяется большое количество железобетонных изделий. Железобетон является основным конструкционным материалом в капитальном строительстве, при этом ежегодное потребление арматурной стали и закладных деталей достигает десятков миллионов тонн, а удельный расход металла на 1 м³ железобетона составляет в среднем 70 кг. Используемый в железобетонных изделиях металл практически не возвращается в виде лома и поэтому не подлежит возврату в производство из металлофонда страны. В связи с этим необходимо экономно расходовать сталь за счет увеличения ее прочности.

Особенно эффективно использование арматурных сталей в изделиях, конструкциях и сооружениях из предварительно напряженного железобетона, получающих все более широкое применение. Так, применение упрочненной арматуры и проволоки с прочностью 600...1300 МПа за счет повышения расчетных сопротивлений позволяет снизить расход металла на 20...55 %.

Схема технологического оборудования, на котором производится прокатка, изображена на рис. 1, а схема силовой интенсификации при двухручьевой прокатке показана на рис. 2.

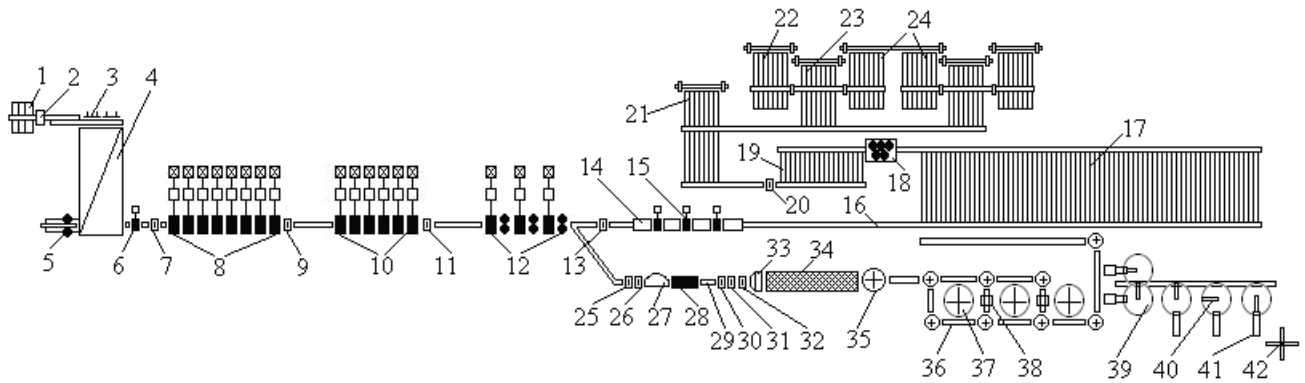


Рис. 1. Схема расположения технологического оборудования мелкосортно-проволочного стана 320/150:

- 1 – загрузочная решетка; 2 – кантователь; 3 – втачиватель; 4 – нагревательная печь; 5 – стеллаж «возвратов»; 6, 15 – трайб-аппараты; 7 – разрывные ножницы; 8 – черновая группа клеток 500/400; 9, 11 – кривошипные ножницы № 51 и № 52; 10 – промежуточная группа клеток 400; 12 – чистовая группа клеток 320; 13 – кривошипно-эксцентрикковые ножницы № 53; 14 – участок термоупрочнения; 16 – рольганг; 17 – холодильник; 18 – роликотправильная машина; 19 – транспортер; 20 – ножницы холодной резки; 21 – пакетирующее устройство; 22, 23, 24 – штабелирующие устройства; 25, 26 – кривошипно-эксцентрикковые ножницы; 27 – петлерегулятор; 28 – десятиклетевой проволочный блок 215/170; 29 – установка водяного охлаждения; 30, 31 – калибровочные ножницы; 32 – отходокрошитель; 33 – виткоукладчик; 34 – участок воздушного охлаждения; 35 – виткосборник; 36 – конвейер; 37 – опрокидыватели; 38 – уплотнение и увязка бунтов; 39 – устройство для передачи бунтов; 40 – сьемник бунтов; 41 – транспортер; 42 – бунтопакетировочная машина

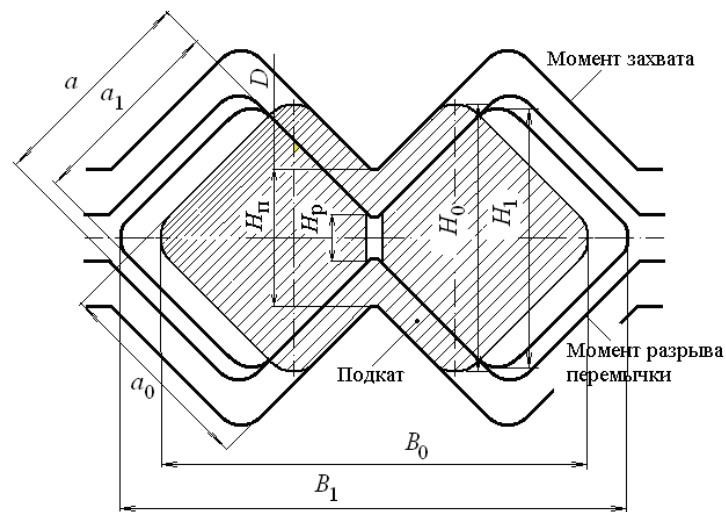


Рис. 2. Схема силовой интенсификации двухручьевого раската

Режимы прокатки характеризуются скоростью прокатки и температурным перепадом между 2-й и 20-й клетью. Силовая и температурная интенсификация достигалась за счет варьирования скорости прокатки и температурного перепада между клетями, которые определяли температурное поле и напряженно-деформированное состояние заготовки. Скорость прокатки регулировалась в диапазоне 12,0...17,5 м/с, максимальная температура на 2-й клетке составляла 1180 °С, а минимальная температура на 20-й клетке – 1100 °С, что значительно выше температуры полиморфных превращений.

2. Исследование и формирование направлений изменения структуры листовых заготовок из стали марки 10ХСНД с жаростойким покрытием при их прокатке.

При прокатке листовых заготовок, осуществляемой при высоких температурах и степенях пластической деформации, образуется окалина, которая ухудшает качество и товарный вид обработанной поверхности. Существуют различные способы устранения образования окисной пленки при нагреве исходной заготовки и удаления самой окисной пленки после нагрева [6], в том числе нанесение жаростойких покрытий, в частности алюминия, методом электродуговой металлизации.

Защитные жаростойкие покрытия, применяемые при горячей прокатке, не только снижают активность окисления, но и влияют на характер контактного взаимодействия заготовки с валками. Установлено, что разрушение защитного покрытия при прокатке приводит к образованию мелкодисперсных частиц, которые во фрикционном процессе между деформируемым материалом и валком проявляют себя как твердая смазка, снижая коэффициент трения и стимулируя формирование более равновесной микроструктуры материала после прокатки.

3. Определение технологических методов обеспечения долговечности болтовых соединений.

Обеспечение высоких ресурсных показателей является одной из основных задач при создании современных пассажирских и транспортных самолетов. Отказы вследствие повреждений планера самолета в общей сумме отказов составляют 12...30 %. Надежность и долговечность авиационных конструкций в значительной степени определяется усталостной прочностью наиболее ответственных деталей и элементов конструкции планера. В процессе эксплуатации разрушения возникают главным образом в местах возникновения очагов концентрации напряжений.

Основными конструктивно-технологическими параметрами, оказывающими влияние на ресурс болтовых соединений, являются:

- характер посадки болта в отверстие;
- упрочняющая обработка отверстий под болты;
- осевая стяжка пакета в результате свинчивания болтового соединения;
- точность и стабильность технологических процессов выполнения отверстий и соединений в целом.

Результаты испытаний образцов из алюминиевого сплава марки В95Т со свободными дорнированными отверстиями диаметром 8 мм показали, что дорнирование отверстий с натягом 3,0...3,5 % повышает долговечность образцов примерно в 3...5 раз [7].

Экспериментальные исследования по прогнозированию и мониторингу предельных состояний конструкционных материалов при различных траекториях циклического нагружения по параметрам акустической эмиссии проводились на испытательной машине МИК40 в лаборатории «Обработка металлов давлением» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Достоинствами процесса дорнирования отверстий являются:

- снижение шероховатости поверхности отверстий;
- простота конструкции дорнов и, соответственно, их низкая стоимость;
- отсутствие влияния субъективного фактора на качество дорнированных отверстий.

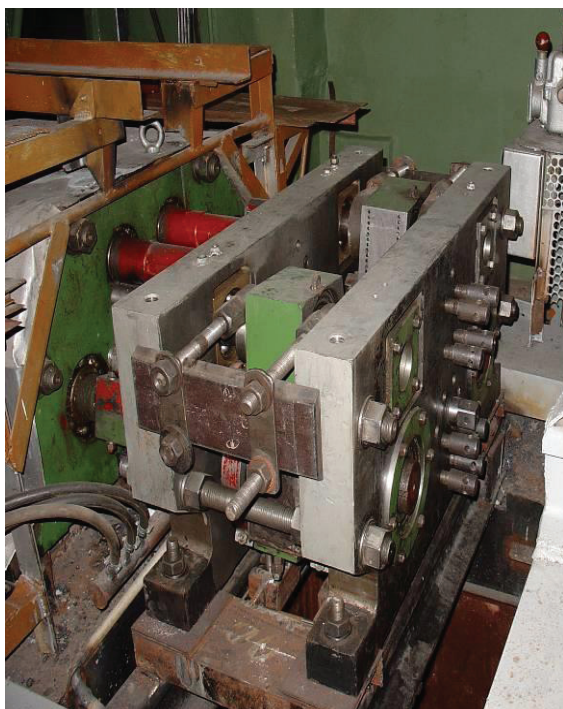
4. Совершенствование существующих и разработка новых совмещенных процессов литья и деформации металла.

В рамках совершенствования существующих и разработки новых совмещенных процессов литья и деформации металла были предложены конструктивные схемы технологических устройств – установок непрерывного литья и деформации металла (УНЛДМ), позволяющих в непрерывном режиме получать металлоизделия различных конфигураций поперечных сечений. На рис. 3 представлены внешний вид и конструктивная схема одного из вариантов устройств – установки вертикального литья и деформации металла. Сущность разработанного технологического процесса заключается в совмещении в одном устройстве одновременно трех технологических процессов, а именно непрерывного литья, жидкой штамповки и горячей обработки металлов давлением. В состав комплекса оборудования входят: плавильный агрегат, заливочно-дозировочное устройство и УНЛДМ с регулируемым приводом. УНЛДМ, реализующая идею полного совмещения процессов кристаллизации жидкого металла и его последующего деформирования в заданный профиль, выполняется в виде кристаллизатора с подвижными стенками, которые осуществляют: отвод тепла из зоны кристаллизации; подачу металла в зону деформации; обжатие металла в заданный профиль; калибровку и выдачу профиля.

Основные конструктивно-технические характеристики:

- производительность – 2,5...4,0 м/мин;
- габариты УНЛДМ без привода – 1000×1000×500 мм;
- мощность электропривода – 65 кВт;
- площадь поперечного сечения получаемого профиля – 100...1600 мм²;
- степень деформации изделий (регулируемая) – до 80 %.

а)



б)

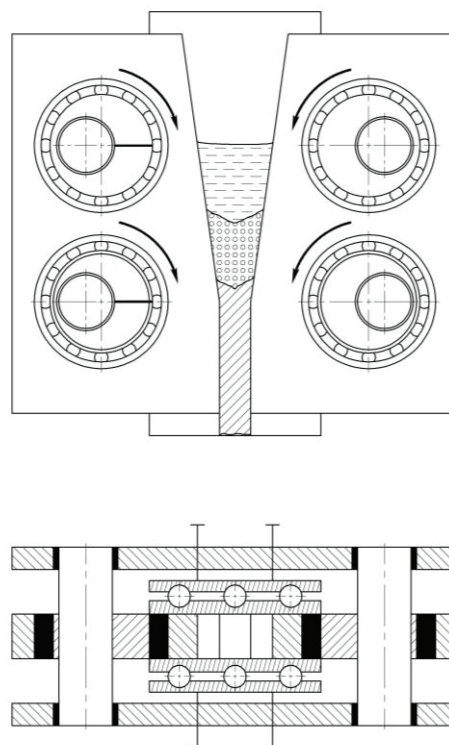


Рис. 3. Внешний вид (а) и конструктивная схема (б) УНЛДМ вертикального типа

Применение разработанной технологии позволяет:

- существенно (в 3 – 4 раза) сократить производственные площади под технологическое оборудование;

- сократить количество технологических переходов при производстве металлоизделий;
- исключить устройства для предварительного нагрева заготовок.

Для совершенствования и целесообразности дальнейшей совместной деятельности КнАГТУ и предприятий необходимо в настоящее время изменить приоритеты в деятельности. В основу должна быть положена научно-техническая деятельность, направления которой были определены в ходе первого года совместной работы. Кроме, того первоочередными задачами должны быть: обеспечение проведения совместных фундаментальных и прикладных НИР, адресная подготовка высококвалифицированных специалистов и специалистов высшей квалификации и их мониторинг по согласованию с работодателем по соответствующим профилям деятельности металлургической промышленности и профориентационной работы в школах, лицеях, колледжах и техникумах г. Комсомольска-на-Амуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов, Б. И. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии / Б. И. Семенов, К. М. Куштаров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 223 с.
2. Минаев, А. А. Совмещенные металлургические процессы / А. А. Минаев. – Донецк: Изд-во «УНИТЕХ», 2008. – 552 с.
3. Черномас, В. В. Теоретическое и экспериментальное исследование совмещенного процесса литья и деформации металла / В. В. Черномас, В. И. Одинокоев, А. А. Соснин. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 130 с.
4. Иванов, В. Н. Специальные виды литья: учеб. пособие для студ. вузов / В. Н. Иванов. – М.: МГИУ, 2007. – 315 с.
5. Интенсификация технологии производства арматуры для железобетонных изделий / В. В. Лиманкин, Б. Н. Марьин, В. А. Ким [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и техники. – 2011. – № II-1(6). – С. 71-75.
6. Волков, К. В. Совершенствование технологии прокатки – разделения арматурного профиля на мелко-сортных станах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Волков Константин Владимирович. – Новокузнецк, 2012. – 24с.
7. Пат. на полезную модель № 128138 Российская Федерация. Инструмент для обработки отверстий / В. Н. Быченко, Б. Н. Марьин, Е. Б. Щелкунов [и др.].– № 2012143584/02; заявл. 11.10.2012; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 4.
8. Лиманкин, В. В. Исследование и совершенствование технологических процессов прокатки на мелко-сортно-проволочном стане 320/150 с целью повышения эффективности производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Лиманкин Владимир Васильевич. – Екатеринбург, 2013. – 24 с.

Штарев Д. С., Штарева А. В.
Dmitry S. Shtarev, Anna V. Shtareva

**ТЕХНОЛОГИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАТАЛИЗАТОРОВ
ВИДИМОГО СВЕТА**

**CATALYTIC TREATMENT OF INDUSTRIAL SEWAGE USING VISIBLE LIGHT
CATALYSTS**



Штарев Дмитрий Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры «Физика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: Shtarev@mail.ru
Mr. Dmitrij S. Shtarev – PhD in Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Department of Physics, the Far Eastern State Transport University (Russia, city of Khabarovsk). E-mail: Shtarev@mail.ru.



Штарева Анна Владимировна – преподаватель кафедры «Химия и экология» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: nishporka@inbox.ru
Ms. Anna V. Shtareva – Lecturer, Department of Chemistry and Ecology, the Far Eastern State University of Transport (Russia, city of Khabarovsk). E-mail: nishporka@inbox.ru.

Аннотация. Работа посвящена изучению каталитической деструкции органических веществ в водной среде с применением в качестве катализатора видимого света композиции висмутат кальция – оксид висмута, $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$. Для характеристики полученного полупроводникового фотокатализатора был использован метод сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазовый анализ. Проведена апробация катализатора для очистки сточных вод от нефтепродуктов.

Summary. The paper explores the catalytic destruction of organic matter in water using a visible light catalyst of calcium bismuthate - bismuth oxide ($\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$). For the characterization of the semiconductor photocatalyst we use scanning electron microscopy and X-ray phase analysis. The catalyst has been tested for treating water sewage of petroleum products.

Ключевые слова: каталитическая деструкция, катализатор видимого света, композиция висмутат кальция – оксид висмута, $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$, сточные воды, нефтепродукты.

Key words: catalytic destruction, visible light catalyst, calcium bismuthate - bismuth oxide, $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$, sewage, petroleum products.

УДК 628.316

Антропогенная нагрузка на окружающую природную среду усиливается с каждым годом. Немалый вклад в это вносят сточные воды нефтеперерабатывающих, железнодорожных, автомобильных и других предприятий. Среди огромного количества загрязнителей водных экосистем одну из лидирующих позиций занимают органические соединения различных классов.

Современная экологическая ситуация диктует необходимость глубокой (деструктивной) очистки сточных вод от поллютантов, независимо от объемов сточных вод, сбрасываемых в водоемы. При больших объемах стоков (городские очистные сооружения) широко применяется биологическая очистка с использованием аэробных микроорганизмов. При малых объемах сточных вод (например, линейные предприятия железнодорожного транспорта) целесообразней и экономически выгодней использовать деструктивные установки для локальной очистки стоков (термическая, реагентная, электрохимическая деструкция, озонирование, фотолиз). Однако каждый из перечисленных методов деструкции не является универсальным, характеризуется специфическим оборудованием, широким диапазоном варьируемых параметров, которые влияют на качество очистки воды и степень токсичности продуктов деструкции, значительным энергопотреблением.

Полупроводниковые фотокатализаторы являются экологически дружественной технологией избавления от токсических органических загрязнителей воды (гидрополлютантов) и атмосферного воздуха. Они позволяют использовать для утилизации загрязнителей безопасную и чистую солнечную энергию. Этим обусловлен повышенный интерес к полупроводниковым фотокатализаторам на протяжении последних лет. Среди всех фотокаталитических материалов, о которых сообщалось ранее, наибольшей популярностью обладает диоксид титана TiO_2 , который является фотокатализатором окислительного разложения органических веществ в силу своих уникальных характеристик, химической стабильности и высокой активности [6; 3; 21, 23]. Однако диоксид титана обладает широкой запрещенной зоной (3,2 эВ – для анатаза, 3,0 эВ – для рутила), поэтому может быть фотовозбужден только излучением УФ-диапазона, которого в спектре солнечного света насчитывается только 4 %. Для того чтобы повысить эффективность использования солнечной энергии в спектральном диапазоне видимого излучения ($\lambda > 420$ нм) при каталитическом разложении органических веществ, разрабатываются каталитические композиции, чувствительные к излучению видимого диапазона.

Существуют нескольких принципиальных способов сенсibilизации (очувствления) диоксида титана к излучениям видимого диапазона. Первый – внедрение в кристаллическую структуру TiO_2 ионов переходных металлов или анионов (таких, как N, C, S) [5; 2; 17]. Второй – сочетание двух или более полупроводников [1; 15; 13]. Третий – сенсibilизация диоксида титана органическими красителями [9; 16]. Однако такие способы сенсibilизации значительно (до двух порядков) снижают каталитическую активность TiO_2 .

С другой стороны, ряд исследователей предпринял попытку получения фотокатализаторов, чувствительных к видимому излучению не на основе диоксида титана [18; 14; 10; 11; 20]. За последнее десятилетие в этом направлении было получено и исследовано несколько новых полупроводниковых фотокаталитических композиций, таких, как $CaBi_2O_4$ [18], Bi_2SbVO_7 [14], $ZnGa_2O_4$ [10] и ряд других. Как правило, указанные фотокатализаторы содержат в своей структуре ион металла с электронами на внешних электронных уровнях nd^{10} или $(n-1)d^{10}ns^2$. Они могут гибридизироваться с 2p электронными уровнями ионов кислорода, что приводит к уменьшению валентной зоны и появлению определенной чувствительности таких полупроводниковых материалов к видимому излучению. Например, чувствительность ниобата серебра к видимому свету объясняется гибридизацией электронных орбиталей 4d серебра и 2p кислорода. Она приводит к подъему «потолка» валентной зоны и, следовательно, к снижению ширины запрещенной зоны [11]. Аналогично может быть объяснена чувствительность ванадата висмута ($BiVO_4$) к излучению видимого диапазона [20]. Однако катализаторы данного типа также обладают существенными недостатками: сложность получения (твердофазные реакции при высокой температуре) и ограниченная каталитическая активность из-за малой площади поверхности и высокой скорости рекомбинации фотовозбужденных электронно-дырочных пар.

Еще одним известным способом повышения каталитической активности является легирование ряда оксидов, таких, как RuO_2 , V_2O_5 и Co_3O_4 , – металлами. Эффект повышения каталитической активности в этом случае объясняется эффективным переносом заряда между легирующим металлом и оксидом, что увеличивает время рекомбинации фотовозбужденных электронно-дырочных пар [12; 19; 8; 4; 7].

В последнее время возрос интерес [22] к фотокаталитическим системам на основе висмутатов щелочноземельных металлов (в частности – к фотокаталитической композиции висмутат кальция – оксид висмута, $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$). Это связано с тем, что в электронной структуре висмута присутствует заполненная электронная орбиталь $d^{10}s^2$, электроны на которой способны поглощать излучения видимого диапазона. Однако всестороннего исследования каталитических свойств и особенностей синтеза подобных систем до сих пор не проводилось. Это делает актуальными исследования каталитических свойств фотокаталитических систем на основе висмутов щелочноземельных металлов.

В работе [22] авторы исследования показали, что подобные системы могут применяться для очистки сточных вод от различных органических загрязнителей. Данное заключение они сделали на основании экспериментов по каталитическому разложению водного раствора метиленового синего. Однако исследования возможностей фотокаталитического разложения реальных гидрополлютантов (таких, как нефтепродукты) ими произведено не было. Также не исследовался вопрос о токсичности, как самого фотокатализатора, так и продуктов фотокаталитического разложения гидрополлютантов.

Целью представленного исследования является определение возможности применения каталитической композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ в технологических комплексах очистки сточных вод от гидрополлютантов. В рамках сформулированной цели основной задачей проводимого исследования было определение эффективности разложения нефтепродуктов в водном растворе при их фотокаталитической деструкции в присутствии катализаторов видимого света (каталитической композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$).

Каталитическая композиция $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ готовилась по известной методике [22] методом осаждения из жидкой фазы. Для этого 9,799 г пятиводного нитрата висмута, 2,385 г четырехводного нитрата кальция и 1,468 г этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) растворялись в 30 мл двухмолярного водного раствора HNO_3 . Затем в полученную смесь добавлялся 35%-й раствор аммиака до выпадения белого осадка. После этого pH раствора доводилось до 8. После выстаивания при комнатной температуре в течение 2 ч осадок отфильтровывался, трижды промывался в дистиллированной воде и высушивался при 100 °С до полного удаления влаги. Далее полученный прекурсор отжигался при 350 °С в течение 10 ч и при 650 °С – 12 ч.

Для характеристики полученного полупроводникового фотокатализатора был использован метод сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазовый анализ. При этом использовался сканирующий электронный микроскоп EVO-40 (Carl Zeiss, Германия) (СЭМ) с энергодисперсионным анализатором (Oxford Instruments, Великобритания) и рентгеновский дифрактометр MiniFlex II (Rigaku, Япония).

В результате такой процедуры получается фотокаталитическая композиция, представленная на рис. 1, а – 1, б. Анализ энергодисперсионных спектров, полученных из различных областей композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ (см. рис. 1, в – 1, з), позволяет сделать следующий вывод. Фотокаталитическая композиция висмутат кальция – оксид висмута представляет собой две фазы. Первая фаза – более крупные кристаллы оксида висмута с размерами 5 – 30 мкм. Вторая – более мелкие кристаллы висмутата кальция с размерами 50 – 150 нм. Из-за особенностей технологии получения каталитической композиции, она представляет собой оксид висмута, покрытый висмутатом кальция (см. рис. 2).

Такая структура каталитической композиции обеспечивает максимально большую площадь соприкосновения двух фаз – висмутата кальция и оксида висмута, – что увеличивает

эффективность разделения фотовозбужденных электронно-дырочных пар и в конечном итоге положительно влияет на каталитическую активность композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$.

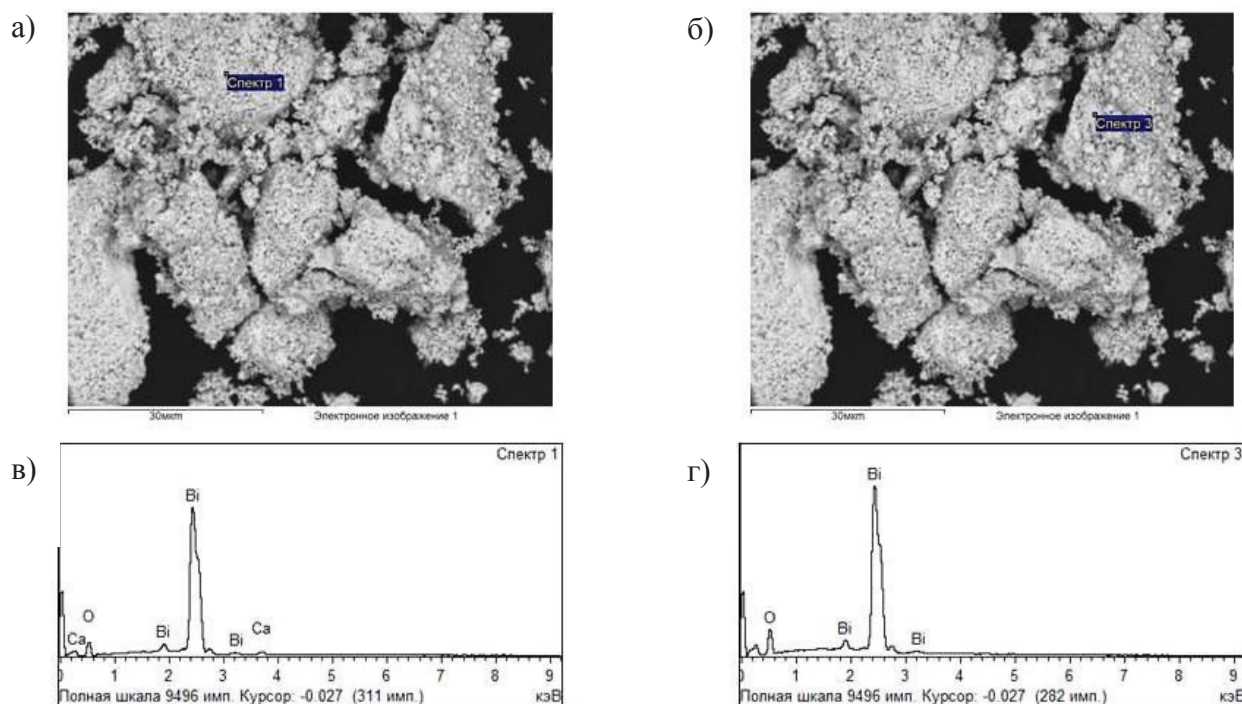


Рис. 1. Изображения каталитической композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$, полученные из различных участков композиции: а, б – СЭМ; в, г – энергодисперсионные спектры

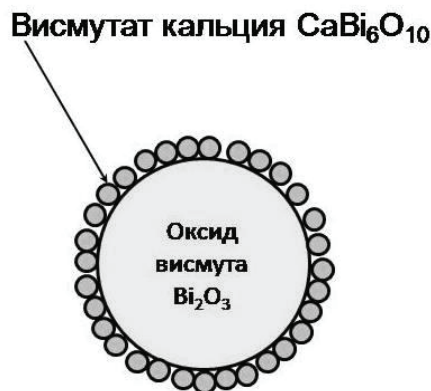


Рис. 2. Схема образования каталитической композиции висмутат кальция – оксид висмута

Каталитическими свойствами обладают только композиции, состоящие из кристаллических фаз оксида висмута и висмутата кальция. Это объясняется тем, что только в кристаллических фазах в полной мере формируются правильные электронные структуры, характерные для полупроводниковых фотокатализаторов. Для того чтобы доказать, что во время синтеза каталитической композиции были сформированы кристаллические фазы оксида висмута и висмутата кальция, был проведен рентгенофазовый анализ полученной каталитической композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ (см. рис. 3). Из рисунка видно, что выбранный метод синтеза позволяет получать как висмутат кальция, так и оксид висмута с высокой степенью кристалличности.

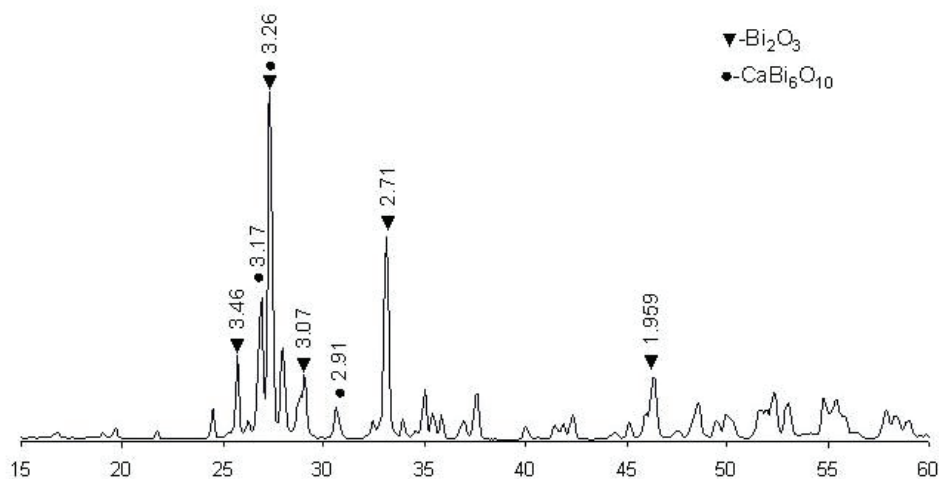


Рис. 3. Рентгенограмма композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$.
Подписи по оси абсцисс – двойные углы

Для качественной оценки возможности каталитического разложения нефтепродуктов в воде видимым светом в присутствии каталитической композиции висмутат кальция – оксид висмута ($\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$) был проведен эксперимент, схема которого приведена на рис. 4.

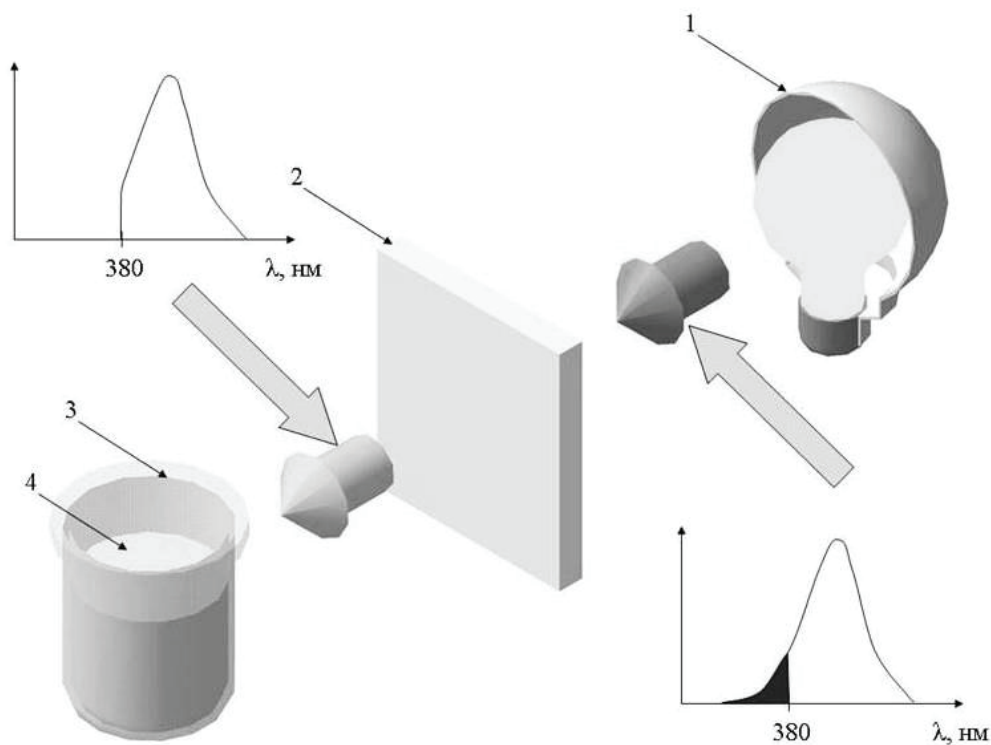


Рис. 4. Схема эксперимента:

- 1 – источник излучения; 2 – светофильтр ЖС-11; 3 – бюкса с притертой крышкой;
4 – смесь водного раствора нефтепродуктов с каталитической композицией $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$

В качестве источника оптического излучения *1* использовалась ксеноновая лампа мощностью 200 Вт. Спектр излучения данной лампы имеет незначительное крыло в УФ-области. Так как основной целью эксперимента являлось доказательство возможности раз-

ложения гидрополлютантов оптическим излучением видимого диапазона, между источником излучения и водным раствором нефтепродуктов устанавливался светофильтр ЖС-11 2, пропускающий излучение с длиной волны более 380 нм. Смесь облучаемых нефтепродуктов с каталитической композицией $\text{CaVi}_6\text{O}_{10}/\text{Vi}_2\text{O}_3$ помещалась в бюкс с притертой крышкой 3 для того, чтобы избежать испарения воды во время облучения.

Для эксперимента по фотостимулированному разложению нефтепродуктов бралось следующее соотношение компонентов: 50 мл водного раствора нефтепродуктов на 200 мг каталитической композиции $\text{CaVi}_6\text{O}_{10}/\text{Vi}_2\text{O}_3$. Исходная концентрация нефтепродуктов в водном растворе составляла 10 мг/л. Температура образцов во время эксперимента не превышала 35 °С. Концентрация нефтепродуктов в образцах определялась в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 с помощью Флюорат-02-3М с точностью до 0,01 мг/л. Для экстракции нефтепродуктов из водного раствора использовался гексан марки ХЧ.

Зависимость концентрации нефтепродуктов от времени экспонирования представлена на рис. 5.

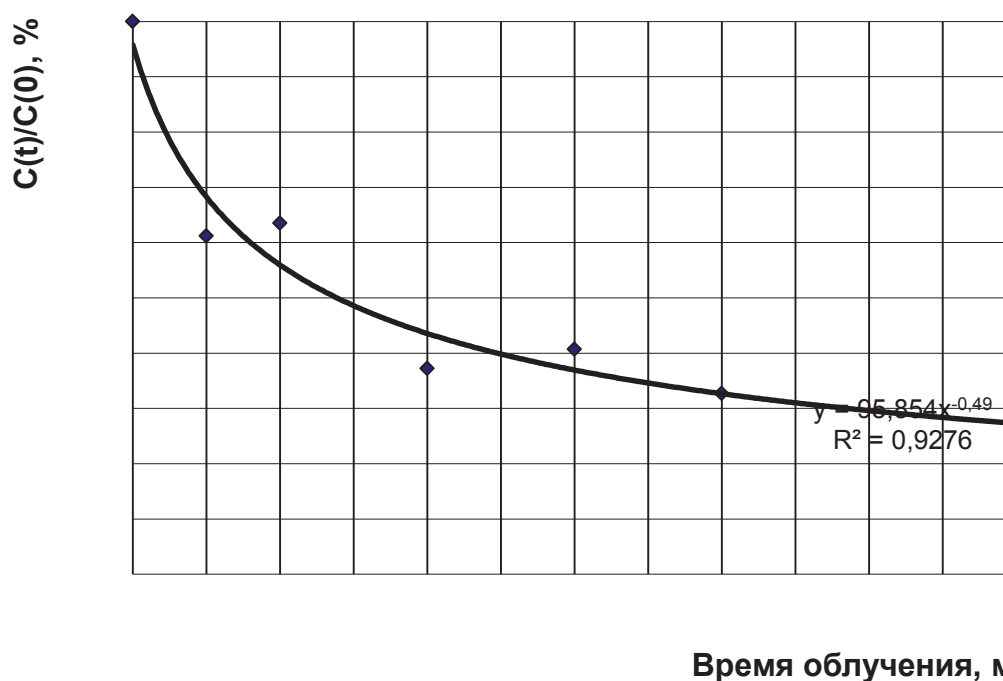


Рис. 5. Зависимость удельной концентрации в водном растворе нефтепродуктов от времени экспонирования в присутствии каталитической композиции $\text{CaVi}_6\text{O}_{10}/\text{Vi}_2\text{O}_3$

Из приведенного рисунка видно, что скорость уменьшения концентрации нефтепродуктов в водном растворе наибольшая в течение первого часа фотокаталитической деструкции. Однако в дальнейшем также наблюдается уменьшение концентрации нефтепродуктов. В целом кинетика уменьшения концентрации нефтепродуктов хорошо описывается степенной зависимостью:

$$C \approx 0.9585C_0 \cdot t^{-0.4899} \approx \frac{C_0}{\sqrt{t}}$$

Таким образом, в данной работе впервые показана принципиальная возможность разложения нефтепродуктов видимым излучением в присутствии каталитической композиции $\text{CaVi}_6\text{O}_{10}/\text{Vi}_2\text{O}_3$.



ЛИТЕРАТУРА

1. Akurati K.K., Vital A., Delleman J.-P., Michalow K., Graule T., Ferri D., Baiker A., Flame-made WO_3/TiO_2 nanoparticles: Relation between surface acidity, structure and photocatalytic activity, *Appl. Catal. B: Chem.* 79 (2008) 53-62.
2. Ashi R., Morikawa T., Ohwaki T., Aoki K., Taga Y., Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides, *Science* 293 (2001) 269-271.
3. Chatterjee D., Dasgupta S., Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 6 (2005) 186-205.
4. Chen F., Wang J., Xu J.Q., Zhou X.P., Visible light photodegradation of organic compounds over $\text{V}_2\text{O}_5/\text{MgF}_2$ catalyst, *Appl. Catal. A: Gen.* 348 (2008) 54-59.
5. Choi W., Termin A., Hoffmann M.R., The role of metal ion dopants in quantum-sized TiO_2 : correlation between photoreactivity and charge carrier recombination dynamics, *J. Phys. Chem.* 98 (1994) 13669-13679.
6. Fujishima A., Rao T.N., Tryk D.A., Titanium dioxide photocatalysis, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 1 (2000) 1-21.
7. He Y.M., Wu Y., Sheng T.L., Wu X.T., Photodegradation of acetone over V-Gd-O composite catalysts under visible light, *J. Hazard. Mater.* 180 (2010) 675-682.
8. He Y.M., Zhao L.H., Wang Y.J., Lin H.J., Li T.T., Wu X.T., Wu Y., Synthesis, characterization and photocatalytic performance of VD_yO_x composite under visible light irradiation, *Chem. Eng. J.* 169 (2011) 50-57.
9. Hirano K., Suzuki E., Ishikawa A., Moroi T., Shiroishi H., Kaneko M., Sensitization of TiO_2 particles by dyes to achieve H_2 evolution by visible light, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 136 (2000) 157-161.
10. Ikarashi K., Sato J., Kobayashi H., Saito N., Nishiyama H., Inoue Y., Photocatalysis for water decomposition by RuO_2 -dispersed ZnGa_2O_4 with d10 configuration, *J. Phys. Chem. B* 106 (2002) 9048-9053.
11. Kato H., Kobayashi H., Kudo A., Role of Ag^+ in the Band Structures and Photocatalytic Properties of AgMO_3 (M: Ta and Nb) with the Perovskite Structure, *J. Phys. Chem. B* 106 (2002) 12441-12447.
12. Long M.C., Cai W.M., Cai J., Zhou B.X., Chai X.Y., Wu Y.H., Efficient photocatalytic degradation of phenol over $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{BiVO}_4$ composite under visible light irradiation, *J. Phys. Chem. B* 110 (2006) 20211-20216.
13. López S.M., Hidalgo M.C., Navío J.A., Colón G., Novel $\text{Bi}_2\text{WO}_6\text{-TiO}_2$ heterostructures for Rhodamine B degradation under sunlike irradiation, *J. Hazard. Mater.* 185 (2011) 1425-1434.
14. Luan J.F., Pan B.C., Paz Y., Li Y.M., Wu X.S., Zou Z.G., Structural, photophysical and photocatalytic properties of new Bi_2SbVO_7 under visible light irradiation, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 11 (2009) 6289-6298.
15. Martin S.T., Morrison C.L., Hoffmann M.R., Photochemical mechanism of size-Quantized vanadium-doped TiO_2 particles, *J. Phys. Chem.* 98 (1994) 13695-13704.
16. Qin G.H., Sun Z., Wu Q.P., Lin L., Liang M., Xue S., Dye-sensitized TiO_2 film with bifunctionalized zones for photocatalytic degradation of 4-chlorophenol, *J. Hazard. Mater.* 192 (2011) 599-604.
17. Sakthivel S., Kisch H., Daylight photocatalysis by carbon-modified titanium dioxide, *Angew. Chem., Int. Ed.* 42 (2003) 4908-4911.
18. Tang J.W., Zou Z.G., Ye J.H., Efficient photocatalytic decomposition of organic contaminants over $\text{Ca-Bi}_2\text{O}_4$ under visible-light irradiation, *Angew. Chem., Int. Ed.* 43 (2004) 4463-4466.
19. Teramura K., Maeda K., Saito T., Takata T., Saito N., Inoue Y., Domen K., Characterization of ruthenium oxide nanocluster as a cocatalyst with $(\text{Ga}_{1-x}\text{Zn}_x)(\text{N}_{1-x}\text{O}_x)$ for photocatalytic overall water splitting, *J. Phys. Chem. B* 109 (2005) 21915-21921.
20. Tokunaga S., Kato H., Kudo A., Selective Preparation of monoclinic and tetragonal BiVO_4 with scheelite structure and their photocatalytic properties, *Chem. Mater.* 13 (2001) 4624-4628.
21. Vinu R., Madras G., Environmental remediation by photocatalysis, *J. Indian Inst. Sci.* 90 (2010) 189-230.
22. Wang Y., He Y., Li T., Cai J., Luo M., Zhao L., Photocatalytic degradation of methylene blue on $\text{Ca-Bi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ composites under visible light, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 189-190, 1 May 2012, Pages 473-481.

Дзюба В. А., Глушакова Ю. С.
Victor A. Dzyuba, Julia S. Glushakova

**ПРИМЕНЕНИЕ СОСТАВНОЙ ФУНКЦИИ ДИАГРАММЫ СЖАТОГО БЕТОНА
ДЛЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ КОНСТРУКЦИЙ**

**ON USING THE BLENDING FUNCTION OF A COMPRESSED CONCRETE DIAGRAM
FOR DEFORMATION ASSESSMENT OF STRUCTURES**



Дзюба Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Victor A. Dzyuba – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Civil Engineering and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr. E-mail: fks@knastu.ru



Глушакова Юлия Сергеевна – магистрант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Ms. Julia S. Glushakova – graduate student, Department of Civil Engineering and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur), 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Pr. E-mail: fks@knastu.ru.

Аннотация. Статья посвящена расчету несущих строительных систем с учетом физической нелинейности железобетона. Для описания поведения сжатого бетона предложена полная диаграмма в виде составной функции.

Summary. This paper discusses the problem of deformation assessment of structures by applying the blending function of a compressed concrete diagram.

Ключевые слова: диаграмма сжатия бетона, ниспадающая ветвь, напряженно-деформированное состояние, железобетонные конструкции.

Key words: compressed concrete, deformation assessment, civil engineering.

УДК 69.07

Использование деформационной модели при расчете железобетонных конструкций считается предпочтительным. В основу деформационного расчета положены полные диаграммы деформирования бетона и арматуры [1].

В железобетонной конструкции на поведение бетона за пределом прочности оказывает влияние целый ряд факторов: армирование, скорость деформирования и т. д. Наличие отдельной линейной функции для описания стадии псевдопластического деформирования бетона позволяет учесть данные факторы. В настоящей статье предлагается описывать диаграмму сжатия бетона в виде составной функции (см. рис. 1): криволинейного участка 1 и двух прямолинейных участков 2 и 3 на стадии разрушения.

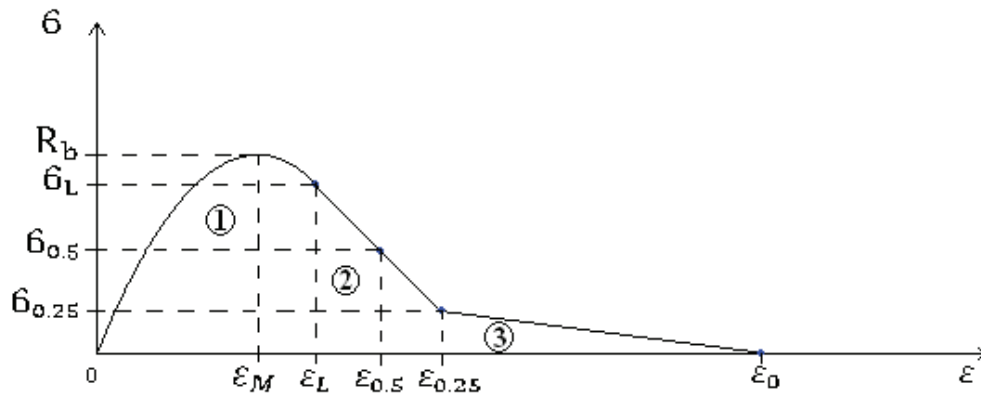


Рис. 1. Диаграмма деформации бетона

Для описания восходящего участка и начального этапа стадии разрушения ($0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_L$) предлагается использовать зависимость, приведенную в работе [2, 12]:

$$\sigma_b = R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D - 2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1}, \quad (1)$$

где σ_b – текущее напряжение; R_b – призменная прочность бетона; D – константа; ε_b – текущая деформация; ε_M – деформация, соответствующая призменной прочности бетона.

Константа D определяется по формуле

$$D = \frac{E_b \varepsilon_M}{R_b},$$

где E_b – начальный модуль упругости.

Нисходящая ветвь диаграммы сжатия бетона описывается двумя прямыми линиями:

– в интервале $\varepsilon_L < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{0,25}$ напряжение σ_b вычисляется по формуле

$$\sigma_b = M - N\varepsilon_b, \quad (2)$$

где ε_L – деформация, соответствующая началу первого линейного нисходящего участка; $\varepsilon_{0,25}$ – деформации бетона при $\sigma_{0,25}$; M, N – характеристики ниспадающей ветви диаграммы сжатия;

– в интервале $\varepsilon_{0,25} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_0$ напряжение σ_b вычисляется по формуле

$$\sigma_b = M_{0,25} - N_{0,25}\varepsilon_b. \quad (3)$$

Для вычислений по формулам (2), (3) используем следующие выражения:

$$M = \sigma_L + N\varepsilon_L,$$

где σ_L – напряжение, соответствующее началу первого линейного нисходящего участка;

$$N = \frac{\sigma_L - \sigma_{0,5}}{\varepsilon_{0,5} - \varepsilon_L},$$

где $\sigma_{0,5}$ – значение напряжения, равное $0,5R_b$; $\varepsilon_{0,5}$ – значение деформации бетона при $\sigma_{0,5}$;

$$M_{0,25} = \sigma_{0,25} + N_{0,25}\varepsilon_{0,25},$$

где $\sigma_{0,25}$ – значение напряжения, равное $0,25R_b$; $\epsilon_{0,25}$ – значение деформации бетона при $\sigma_{0,25}$:

$$N_{0,25} = \frac{\sigma_{0,25}}{\epsilon_0 - \epsilon_{0,25}}$$

$$\epsilon_{0,f} = \frac{\sigma_L}{N} + \epsilon_L,$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_{0,f} + 10 \cdot 10^{-3}.$$

Для определения величин ϵ_M и $\epsilon_{0,5}$ используется зависимость, предложенная в работе [3, 9]. Так, деформация ϵ_M определяется по формуле

$$\epsilon_M = \frac{(18 + 6_{bm})(626_{bm} + 0,6756_{bm}^2 + 22)}{(53000 - 626_{bm})(76_{bm} + 6_{bm}^2 + 22)}.$$

Для вычисления $\epsilon_{0,5}$ по формулам работы [3, 9] были построены диаграммы сжатия бетона для классов от В20 до В100 и вычислены значения деформаций $\epsilon_{0,5}$. Далее произведена обработка этих величин методом наименьших квадратов и предложена зависимость в виде полинома третьей степени как функция, связывающая $\epsilon_{0,5}$ и R_b :

$$\epsilon_{0,5} = (-0,000011R_b^3 + 0,002093R_b - 0,152310R_b + 7,789345) \cdot 10^{-3}.$$

Сопоставление графиков деформирования сжатого бетона, построенных по данным работы [3, 9] и по материалам этой статьи, показывает хорошее совпадение полученных результатов (рис. 2).

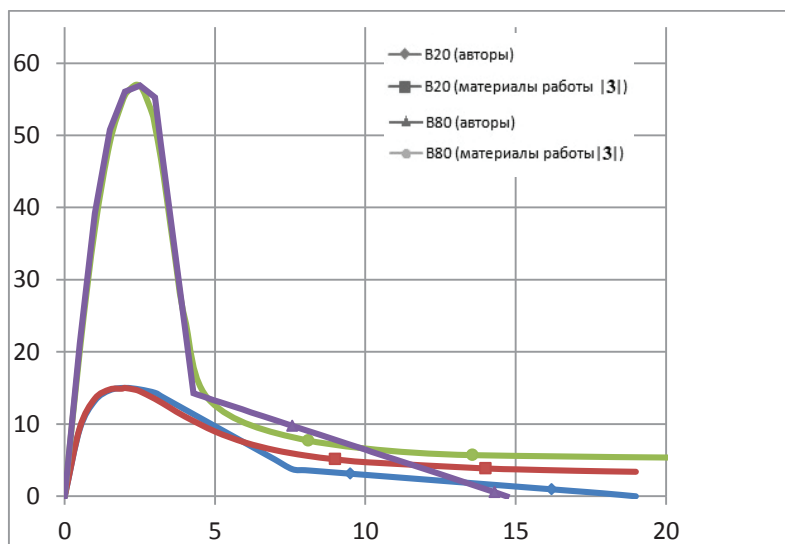


Рис. 2. Сравнение диаграмм деформирования бетона В20 и В80

Предложенная для описания диаграммы сжатого бетона составная функция позволяет оценить НДС железобетонной конструкции при изгибе. В расчетной модели железобетонного элемента каждое волокно сжатой зоны бетона работает по закону, описываемому выражениями (1) – (3).

Диаграмма растянутой арматуры представляется кусочно-линейной функцией. Для оценки условия равновесия на каждом этапе нагружения проверяется выполнение условия $N_b = N_s$, а для вычисления внутреннего изгибающего момента используется выражение

$$M_{int} = M_b + M_s.$$

При этом выражение для вычисления N_b имеет следующий вид:

$$N_b = \frac{bx}{\varepsilon_{bf}} \int_0^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b,$$

где b – ширина элемента; x – высота сжатой зоны бетона; ε_{bf} – деформация крайнего сжатого волокна бетона.

Здесь имеем следующее:

– при $0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_L$

$$\int_0^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_{bf}} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} d\varepsilon_b;$$

– при $\varepsilon_L < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{0,25}$

$$\int_0^{\varepsilon_L} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_L} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{bf}} (M - N\varepsilon_b) d\varepsilon_b;$$

– при $\varepsilon_{0,25} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_0$

$$\begin{aligned} \int_0^{\varepsilon_L} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_L} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} d\varepsilon_b + \\ + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} (M - N\varepsilon_b) d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_{bf}} (M_{0,25} - N_{0,25}\varepsilon_b) d\varepsilon_b; \end{aligned}$$

– при $\varepsilon_{bf} > \varepsilon_0$

$$\begin{aligned} \int_0^{\varepsilon_L} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_0} \sigma_b(\varepsilon_b) d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_L} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} d\varepsilon_b + \\ + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} (M - N\varepsilon_b) d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_0} (M_{0,25} - N_{0,25}\varepsilon_b) d\varepsilon_b. \end{aligned}$$

Момент внутренних усилий относительно геометрической оси элемента определяется выражением

$$M_{int} = N_b \left(\frac{h}{2} - x \right) + \frac{bx^2}{(\varepsilon_{bf})^2} \int_0^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + N_s \left(\frac{h}{2} - a \right),$$

где h – высота железобетонного элемента; a – высота защитного слоя.

Здесь имеем следующее:

– при $0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_L$

$$\int_0^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_{bf}} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} \varepsilon_b}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} d\varepsilon_b;$$

– при $\varepsilon_L < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{0,25}$

$$\int_0^{\varepsilon_L} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_L} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b^2}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} +$$

$$+ \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{bf}} (M - N\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b;$$

– при $\varepsilon_{0,25} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_0$

$$\int_0^{\varepsilon_L} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_{bf}} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_L} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} \times$$

$$\times \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} (M - N\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_{bf}} (M_{0,25} - N_{0,25}\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b;$$

– при $\varepsilon_{bf} > \varepsilon_0$

$$\int_0^{\varepsilon_L} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_0} \sigma_b(\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b = \int_0^{\varepsilon_L} R_b \frac{D \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}}{\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M}\right)^2 + (D-2) \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_M} + 1} \times$$

$$\times \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_L}^{\varepsilon_{0,25}} (M - N\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b + \int_{\varepsilon_{0,25}}^{\varepsilon_0} (M_{0,25} - N_{0,25}\varepsilon_b) \varepsilon_b d\varepsilon_b.$$

Предлагаемая методика вычислений позволяет строить диаграмму «момент – кривизна» для железобетонного элемента (рис. 3), оценивать его жесткость и использовать полученные данные при расчете статически неопределимых систем в физически нелинейной постановке [4; 5].

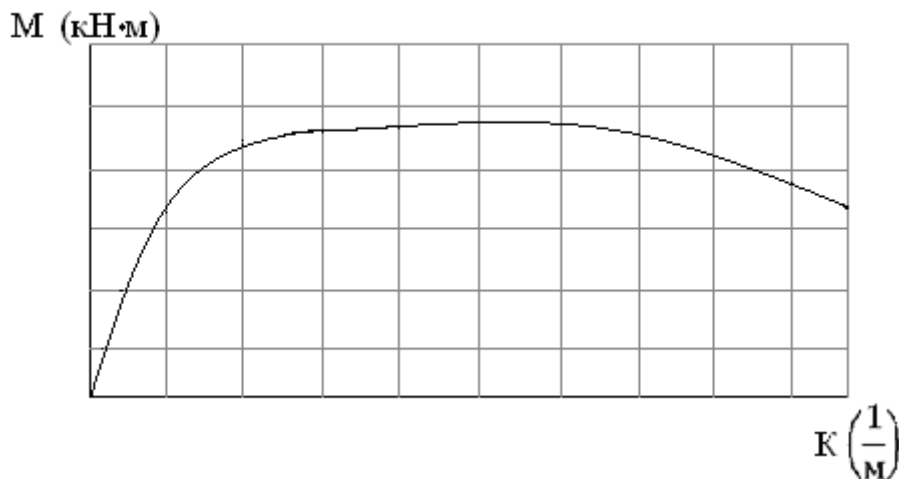


Рис. 3. Общий вид диаграммы «момент – кривизна»

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения / Госстрой России. – М.: ДЕАН, 2005. – 64 с.
2. Дзюба, В. А. Полные диаграммы деформирования элементов диафрагмы жесткости каркасно-панельных зданий / В. А. Дзюба // Гражданское строительство и архитектура. Серия «Жилищное строительство». Экспресс-информация. – 1983. – № 3. – С. 11-14.
3. Карпенко, Н. И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры. Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций / Н. И. Карпенко, Т. А. Мухамедиев, А. Н. Петров. – М.: НИИЖБ, 1986. – С. 7-25.
4. Тарануха, Н. А. Определение жесткостной характеристики нестандартного материала упругой связи динамической системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV-1(4). – С. 4-11.
5. Тарануха, Н. А. Математическая модель деформирования упругой связи из нестандартного материала для динамической системы с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 4-9.

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ
CHRONICLE OF SCIENTIFIC LIFE

Суздорф В. И., Мешков А. С.
V. I. Suzdorf, A. S. Meshkov

**ИННОВАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ
В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА**

**INNOVATIVE RESEARCH AND DEVELOPMENT AS PART OF INTERNATIONAL
COOPERATION**

Суздорф Виктор Иванович – профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), директор Учебно-научного инновационного центра энергосбережения при КнАГТУ. E-mail: kepapu@knastu.ru.

Mr. V. I. Suzdorf – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Electric Drive Engineering and Industrial Automation, Director of the Innovative Educational Centre for Energy Efficiency, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Мешков Александр Сергеевич – кандидат технических наук, заместитель директора Технопарка Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: meshkov@live.ru.

Mr. A. S. Meshkov – PhD in Engineering, Deputy Director of the Research&Technology Park, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: meshkov@live.ru.

В январе 2014 года Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет выиграл конкурс на участие в переговорах с представителями малых инновационных предприятий Республики Корея. Организатором и спонсором мероприятия выступила компания КОТРА, которая в России является информационным представительством ряда корейских компаний, доверивших ей защищать их интересы и представлять их деятельность в Российской Федерации, а также еще в 128 странах.

Российским компаниям, отобранным для сотрудничества с корейскими предприятиями, оказывалось всевозможное содействие, а именно:

- предоставление образцов и каталогов продукции;
- ведение деловой переписки и переговоров;
- организация поездки в Республику Корея для встречи с представителями компаний.

Встреча происходила в городе Тэджон, что на 130 км южнее столицы республики Сеула. Мероприятие проводилось в Парк Тэджон Экспо – научно-выставочном центре так называемой «силиконовой долины» Кореи, который расположен в живописном месте города. В долине наук Тэток, специально созданной для любителей техники, есть возможность увидеть новейшие достижения технического прогресса. Парк Тэджон Экспо служит местом проведения всемирных выставок высоких технологий. На площадях центра разместились десятки павильонов, в том числе известнейших мировых фирм, таких как Samsung, LG, KIA и многих других.

В рамках бизнес-программы состоялись встречи с представителями компаний, работающих в сфере энергоэффективности и IT. Программа встреч была утверждена заранее в результате анализа взаимных интересов.

Были представлены образцы продукции полупроводниковых осветительных приборов, причем очень широкой линейки мощностей, вплоть до систем освещения открытых стадионов. Особый интерес представляют «умные» защитные устройства отключения электрических цепей, множество разработок в области использования возобновляемых источников энергии, в частности, солнечной энергии: солнечные панели различного исполнения (например, варианты установки вместо оконных рам и вместе с оконными рамами), системы преобразования и накопления энергии от солнечных панелей и многое другое.

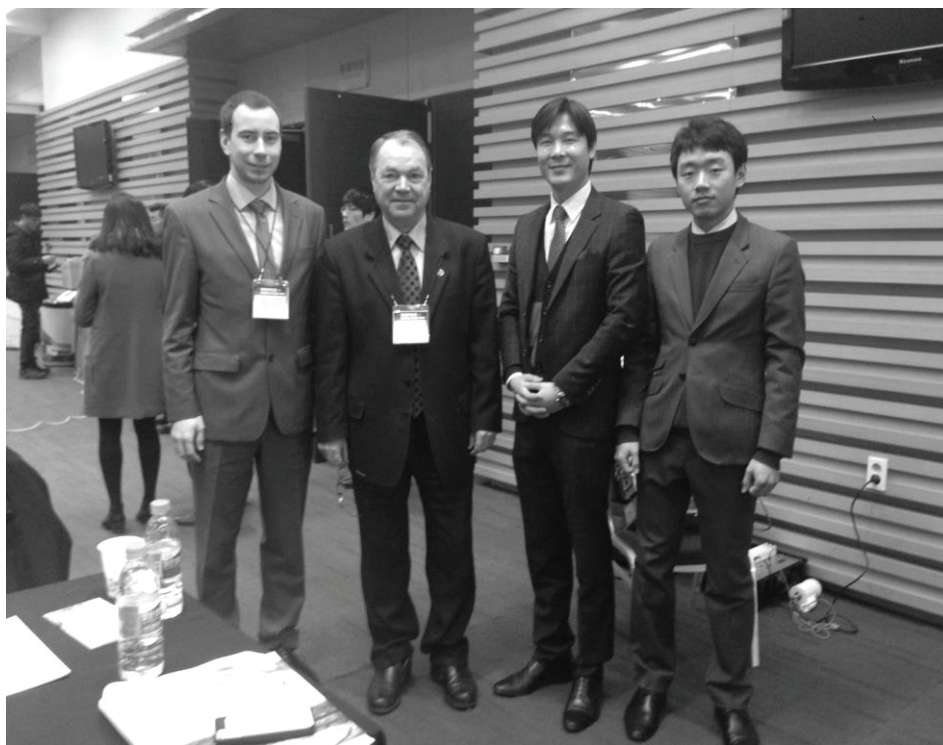
Суздорф В. И., Мешков А. С.

ИННОВАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Результатами встреч стали взаимный интерес (научный, коммерческий), более детальные переговоры и укрепление найденных контактов. Сформулированы конкретные предложения к корейской стороне о дальнейшем сотрудничестве.



Зал переговоров



Сотрудники КНАГТУ Суздорф В. И., Мешков А. С. во время встречи с генеральным менеджером NTBANK Co., Ltd Ювоном Юном (второй справа)

Ахметова А. В.
Anna V. Akhmetova

ОБЩЕСТВЕННОЕ ОБСУЖДЕНИЕ «ИННОВАЦИОННАЯ ПОЛИТИКА В ХАБАРОВСКОМ КРАЕ»

INNOVATION POLICY FOR THE KHABAROVSK REGION: A PUBLIC DISCUSSION



Ахметова Анна Валинуровна – кандидат исторических наук, доцент, начальник научного центра социально-экономических и гуманитарных проектов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681035, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Октябрьский, д. 36, кв. 55; 89622960095. E-mail: wyrds@rambler.ru.

Ms. Anna V. Akhmetova – PhD in History, Associate Professor, Director of the Centre for Social Economic and Humanitarian Projects, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681035, Komsomolsk-on-Amur, 36 – 55, Oktyabrskiy Pr.; +7 (962) 2960095. E-mail: wyrds@rambler.ru.

18 апреля 2014 года в конференц-зале КнАГТУ состоялось мероприятие краевого масштаба – Общественное обсуждение отдельных положений государственной программы Хабаровского края «Инновационное развитие и модернизация экономики Хабаровского края». На него были приглашены студенты, аспиранты, научные сотрудники и преподаватели КнАГТУ, депутаты Законодательной Думы Хабаровского края, депутаты Комсомольской-на-Амуре городской Думы, представители администрации г. Комсомольска-на-Амуре.

Программа мероприятия состояла из двух частей: круглого стола «Перспективы развития инновационной деятельности в Хабаровском крае» и определения проблем реализации инновационных проектов в Хабаровском крае.

Открыл общественное обсуждение председатель Законодательной Думы Хабаровского края В. В. Чудов. Он поднял вопрос о создании в г. Комсомольске-на-Амуре Индустриального парка. Это решение было принято Минвостокразвития РФ на базе ОАО «АСЗ». Виктор Владимирович Чудов констатировал, что проблемы, связанные с Индустриальным парком, являются приоритетными для Хабаровского края.

Первым на круглом столе выступил директор Технопарка КнАГТУ Д. Х. Ри с докладом «Развитие инновационной инфраструктуры КнАГТУ». В своем выступлении Дмитрий Хосенович Ри очень подробно рассмотрел все элементы внутренней и внешней инновационной инфраструктуры и охарактеризовал основные направления, которым уделяется наибольшее внимание в вузе. В заключение доклада директор Технопарка кратко обозначил планы на будущее: Технопарк уже не вмещает в себя всех резидентов, поэтому необходимо создание бизнес-инкубатора смешанного типа и обещанного Минвостокразвития Индустриального парка.

Следующий доклад на тему «Создание индустриального парка в г. Комсомольске-на-Амуре» представил заместитель начальника управления промышленности, технологий и научно-технических программ Д. В. Палажченко. В нем были охарактеризованы организационные и финансовые аспекты проблемы. Данный проект реализуется при взаимодействии Минэкономразвития РФ, Минпромторга РФ, Правительства Хабаровского края и КнАГТУ. Для создания законченного производственного цикла Правительством Хабаровского края совместно с промышленными корпорациями разрабатывается концепция Индустриального парка, которая предусматривает две специализации: коммерциализация разработок Технопарка и локализация объемов производства машиностроения.

Заместитель министра экономического развития и внешних связей Хабаровского края Ю. А. Чайка выступил с сообщением на тему «О предоставлении поддержки предприятиям малого и среднего бизнеса». Докладчик рассказал о механизмах финансирования участия в программе, об основных направлениях финансовой поддержки, которые существуют в Хабаровском крае.

Далее в рамках круглого стола началось обсуждение назревших вопросов, в котором приняли участие представители городских предприятий и бизнеса.

Итоги круглого стола подвел В. В. Чудов, который выступил с предложением создать рабочую группу по реализации проекта индустриального парка, в которую войдут представители Минэкономразвития РФ, Мипромторга РФ, Минобрнауки РФ, КнАГТУ, предпринимателей города, городского думы, предприятий города.

После перерыва вторая часть мероприятия началась с обсуждения проблем Технопарка КнАГТУ, в котором приняли участие представители бизнеса, Д. Х. Ри, Э. А. Дмитриев, Ю. А. Чайка, Д. В. Палажченко.

Далее выступил ректор КнАГТУ Эдуард Анатольевич Дмитриев с речью о том, что главной проблемой, которая требует пристального внимания, является подготовка кадров для предприятий и малого бизнеса. Еще одной трудностью является сложная агрессивная среда, в частности, политика ДВФУ.

Заместитель начальника отдела венчурных инвестиций и коммерциализации проектов главного управления модернизации и стратегических инициатив Губернатора и Правительства края В. В. Куслина выступила с предложением обсуждать государственные программы Хабаровского края на самых различных площадках, в том числе и в КнАГТУ.

Директор малого инновационного предприятия ООО НПП «ПОЛИЭЛЕКТРО» А. Е. Любичский представил опыт реализации инновационного проекта «ПОЛИЭЛЕКТРО». Александр Евгеньевич сообщил, что основные направления деятельности – разработка и организация производства автомата резервирования кондиционеров (АРК). В данный момент проводятся испытания объекта АРК. Единственная проблема – это кадры. Способных и талантливых студентов переманивают крупные города: Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск.

Далее выступили самые молодые представители Технопарка КнАГТУ со своими проектами: Пермяков Юрий и Лесков Олег.

Ю. И. Пермяков (У.М.Н.И.К. – 2012) представил свой проект «Система автоматизированного управления дорожным движением». Цель работы – оптимизация дорожного движения и создание инструмента борьбы с транспортными заторами. Результат проекта – программное обеспечение, осуществляющее анализ видеопотока данных.

О. М. Лесков (У.М.Н.И.К. – 2013) рассказал о своем проекте «Конструктор для создания мобильной роботизированной платформы “Громозека”». Данный проект предназначен для создания роботизированных платформ, на основе которых возможно проведения лабораторных работ для студентов электротехнических специальностей.

Итогом выступлений студентов стало вручение благодарственного письма за вклад в развитие Хабаровского края ректору КнАГТУ Э. А. Дмитриеву представителем Министерства образования и науки Хабаровского края.

Консультант отдела инновационных программ и проектов Правительства Хабаровского края, кандидат экономических наук В. Б. Халимендик выступила с докладом «Государственная финансовая и организационная поддержка инновационной деятельности в Хабаровском крае». На обсуждение была вынесена государственная программа Хабаровского края «Инновационное развитие и модернизация экономики Хабаровского края». Виктория Борисовна определила основные приоритетные задачи, которые необходимо выполнить в рамках программы.

Последним докладом на общественном обсуждении стало выступление В. В. Куслиной о проведении ежегодного краевого конкурса молодежных инновационных команд КУБ – 2014. Влада Валерьевна осветила цели и задачи, этапы проведения конкурса и награждение победителей. Основные положения конкурса вызвали бурное обсуждение как со стороны представителей вуза, так и со стороны предприятий, бизнеса.

В целом, все участники общественного обсуждения пришли к выводу о том, что главная проблема – это нехватка кадров, проведение же инновационных конкурсов может помочь в ее решении. Наиболее продуктивным был обмен мнениями между представителями вуза и предпринимателями города, что приведет к более тесным контактам и возможному партнерству.