

УДК 658.511

МИНИМИЗАЦИЯ РЕСУРСОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК НА АВИАСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

© 2016 Ю.В. Полянсков, Д.Ю. Шабалкин, О.Ю. Левкина

Ульяновский государственный университет

Статья поступила в редакцию 24.03.2016

В статье представлена математическая модель оценки ресурсоемкости производственного процесса изготовления литых заготовок. Проведена оценка влияния управляющих воздействий на модель. Представлены рекомендации по совершенствованию производственного процесса изготовления отливок для обеспечения требуемых значений ресурсоемкости.

Ключевые слова: математическая модель, отливка, производственный процесс, ресурсоемкость, риски, функционал потерь

Литые заготовки составляют значительную часть всех заготовок в авиастроении, кроме того в организационной структуре авиастроительного предприятия традиционно есть подразделения, занимающиеся их изготовлением (металлургические производства, литейные цеха). Существующие требования к эффективной организации производства литых заготовок для изделий авиационной техники обусловлены следующими современными тенденциями:

1) Импортозамещение. Решение задачи импортозамещения в наукоемких отраслях промышленности должно быть направлено на создание конкурентоспособных производств, соответствующих современным направлениям развития и организации производства с использованием современных цифровых технологий.

2) Снижение ресурсоемкости. Затраты ресурсов в литейном производстве зависят от организационных, технологических и технических условий производственного процесса. Несовершенство этих условий обуславливает высокие удельные затраты ресурсов при их относительно низкой стоимости по сравнению с заготовительными производствами других стран (ЕС, США) [1].

3) Снижение производственных рисков. На затраты ресурсов оказывают влияние различные неблагоприятные события, приводящие к росту затрат ресурсов в производственном процессе, поэтому необходимо учитывать угрозы, приводящие к потерям ресурсов в производственном процессе, и управлять ими для снижения производственных рисков.

4) затрат ресурсов в производственном процессе, поэтому необходимо учитывать угрозы, приводящие к потерям ресурсов в производственном процессе, и управлять ими для снижения производственных рисков.

5) Создание интегрированных структур. Одной из основных тенденций развития мирового самолетостроения является создание интегрированных структур в виде центров компетенции по производству отдельных компонентов воздушных судов, в том числе на базе действующих производств с внедрением и применением цифровых технологий [2].

6) затрат ресурсов в производственном процессе, поэтому необходимо учитывать угрозы, приводящие к потерям ресурсов в производственном процессе, и управлять ими для снижения производственных рисков.

7) Создание интегрированных структур. Одной из основных тенденций развития мирового самолетостроения является создание интегрированных структур в виде центров компетенции по производству отдельных компонентов воздушных судов, в том числе на базе действующих производств с внедрением и применением цифровых технологий [2].

Сформулированные требования обуславливают необходимость проведения оценки действующего литейного производства, технико-экономического обоснования целесообразности реализации мероприятий по совершенствованию организационных, технологических и технических условий с целью снижения ресурсоемкости и производственно-технологических рисков, а также выработки стратегии развития и модернизации производства.

Формулировка проблемы. В машиностроении известны различные технические решения, направленные на обеспечение требуемых производственных параметров при изготовлении отливок, например, разработаны различные ресурсосберегающие принципы [3], однако не установлена их связь с параметрами производственного процесса и влияние изменения этих параметров на значение ресурсоемкости. Кроме того, среди известных способов и подходов нет методически обоснованных алгоритмов оценки ресурсоемкости производственного процесса, учитывающих многообразие влияющих на него факторов, в том числе случайного характера.

Разработка модели производственного процесса позволит на ней отрабатывать управляющие воздействия, снижающие вероятности проявления угроз при изготовлении отливок. Модель должна оценивать снижение как неэффективных потерь ресурсов за счет управления рисками производственного процесса, так и сокращение нормативов затрат ресурсов вследствие реализации мероприятий по совершенствованию организации производства. Это означает, что задача разработки математической модели оценки и управления ресурсоемкостью производственного процесса изготовления литых заготовок является актуальной и новой.

Полянсков Юрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, президент. E-mail: polyanskovyuv@ulsu.ru
Шабалкин Дмитрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент. E-mail: shabalkindyu@gmail.com
Левкина Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель. E-mail: olenka_levkina@mail.ru

Разработка модели и оценка адекватности, обобщение и разъяснение полученных данных. В разработанной математической модели производственного процесса изготовления литых заготовок формализуются требования выполнения производственной программы при обеспечении условия минимизации затрат ресурсов в виде системы уравнений. В результате проведенного анализа литейного производства

[4] были выделены 6 типов ресурсов, затраты которых влияют на формирование ресурсоемкости производимых литых заготовок – это металл, формовочные материалы, электроэнергия, вода, персонал и время. На рис. 1 приведен перечень параметров производственного процесса, представляющих собой расчетные характеристики затрат ресурсов в производственном процессе.

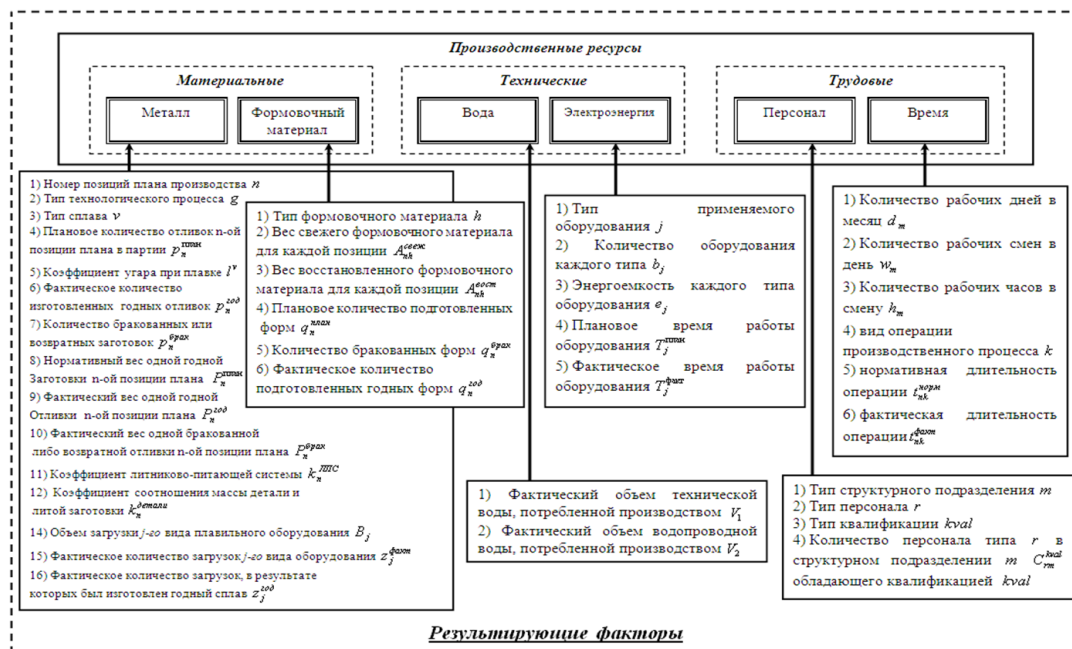


Рис. 1. Параметры производственного процесса изготовления литых заготовок

Для формализации производственного процесса изготовления литых заготовок определены следующие условия и допущения

1) Плановый объем производимых литых заготовок в исследуемом периоде известен.

2) Этап конструкторско-технологической подготовки производства успешно завершен – это означает, что а) разработана вся необходимая конструкторская и технологическая документация;

б) спроектирована и изготовлена необходимая оснастка, она есть в наличии и годная;

в) проведена отработка на технологичность применяемых процессов изготовления заготовок;

3) Определены необходимые ресурсы, инструменты и оборудование.

4) Известна стоимость единицы каждого типа ресурсов.

5) Потери ресурсов в производственном процессе носят случайный характер.

Совокупный план производства заготовок на рассматриваемый период определяется набором плановых значений $P^{план} = (P_1^{план}, \dots, P_N^{план})$ с учётом каждой из N единиц плановой номенклатуры.

Требования выполнения производственной программы формализуются в модели следующими условиями:

1) Количество изготовленных заготовок должно быть не менее планового количества для каждой позиции номенклатурного плана:

$$P_n^{зод} \geq P_n^{план} \quad (1)$$

2) Заданное количество заготовок должно быть изготовлено в течение заданного срока (при условии, что

некоторые позиции плана могли изготавливаться параллельно):

$$\sum_{n=1}^N t_n \leq T^{план} \quad (2)$$

Для обеспечения условия минимизации затрат используемых в производственном процессе ресурсов вводятся локальные функции потерь, которые имеют следующий вид:

$$\varphi^{(i)}_k = \varphi^{(i)}_k(\xi_1, \dots, \xi_m) \quad (3)$$

где i – отвечает заданному виду ресурса, $\xi_1 = P_n^{брак}$, $\xi_2 = Q_n^{брак}$, $\xi_3 = K_n^{ЛПС}$, ..., $\xi_m = h$ – параметры производственного процесса, представленные на рис. 1.

Условия минимизации затрат ресурсов формализуются в виде требований к минимизации локальных функций потерь за счёт выбора значений параметров производственного процесса. Были построены локальные функции потерь для производственного процесса изготовления литых заготовок с учетом выделенных типов ресурсов $\varphi_1, \dots, \varphi_{16}$. (табл. 1).

Таким образом, задача снижения ресурсоемкости производственного процесса изготовления литых заготовок сводится к определению набора значений параметров ξ_i . Минимизация каждой из построенных локальных функций в отдельности не обеспечит требуемый результат. Например, сокращение затрат электроэнергии можно достигнуть за счет сокращения количества рабочего оборудования, однако это приведет к увеличению сроков изготовления заготовок, что недопустимо. Для комплексной оценки ресурсоемкости

производственного процесса строится совокупный функционал потерь таким образом, чтобы его минимальное значение соответствовало минимальной

ресурсоёмкости производственного процесса. Структура предложенной модели приведена на рис. 2.

Таблица 1. Локальные функции потерь

№ п/п	Критерий	Вид локальной функции потерь	
1	план производства должен быть выполнен	$\varphi_1 = \sum_{n=1}^N P_n^{\text{план}} \cdot p_n^{\text{план}} - \sum_{n=1}^N P_n^{\text{зод}} \cdot p_n^{\text{зод}} \rightarrow \min$	(4)
2	сплав должен быть качествен- ный	$\varphi_2 = B_j (z_j^{\text{факт}} \cdot l - z_j^{\text{план}})$	(5)
3	весь приготовленный сплав должен быть залит в формы	$\varphi_3 = B_j \cdot z_j^{\text{зод}} \cdot l^v - \sum_{n=1}^N P_n^{\text{зод}} \cdot k_n^{\text{ЛПС}} \cdot q_n^{\text{зод}} \rightarrow \min$	(6)
4	литниково-питающая система должна быть спроектирована рационально	$\varphi_4 = (\sum_{n=1}^N P_n^{\text{зод}} \cdot k_n^{\text{ЛПС}} \cdot q_n^{\text{зод}} -$ $-\sum_{n=1}^N (P_n^{\text{зод}} \cdot p_n^{\text{зод}} + P_n^{\text{брак}} \cdot p_n^{\text{брак}})) \rightarrow \min$	(7)
5	качество производимых загото- вок должно быть высоким	$\varphi_5 = \sum_{n=1}^N P_n^{\text{брак}} \cdot p_n^{\text{брак}} \rightarrow \min$	(8)
6	фактическое количество изго- товленных форм должно соот- ветствовать плановому	$\varphi_6 = \sum_{n=1}^N (q_n^{\text{зод}} + q_n^{\text{брак}}) - \sum_{n=1}^N q_n^{\text{план}} \rightarrow \min$	(9)
7	обеспечение высокого качества подготавливаемых форм	$\varphi_7 = \sum_{n=1}^N q_n^{\text{брак}} \rightarrow \min$	(10)
8	технологические процессы под- готовки формовочных смесей должны быть рациональными	$\varphi_8 = \sum_{n=1}^N A_{nh}^{\text{свеж}} \cdot q_n^{\text{факт}} \rightarrow \min$	(11)
9	правильное оборудование должно быть рациональным	$\varphi_9 = \sum_{j=1}^{J_1} b_j \cdot e_j \cdot T_j^{\text{факт}} \cdot z_j^{\text{факт}} \rightarrow \min$	(12)
10	литейное производство должно быть экономичным с точки зрения затрат электроэнергии	$\varphi_{10} = (\sum_{j=1}^J b_j \cdot e_j \cdot T_j^{\text{факт}} -$ $-\sum_{j=1}^{J_1} b_j \cdot e_j \cdot T_j^{\text{факт}}) \rightarrow \min$	(13)
11	литейное производство должно быть экономичным с точки зрения затрат водных ресурсов	$\varphi_{11} = \sum_{j=1}^J z_j^{\text{факт}} \cdot V_j^{\text{факт}} +$ $\sum_{n=1}^N q_n^{\text{факт}} \cdot V_n^{\text{факт}} \rightarrow \min$	(14)
12	количество производственного персонала должно быть рацио- нальным для выполнения плана	$\varphi_{12} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^{R_1} c_{rm} \cdot s_{rm} (kval) \rightarrow \min$	(15)
13	количество непроизводствен- ного персонала должно быть рациональным	$\varphi_{13} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R c_{rm} \cdot s_{rm} (kval) -$ $-\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^{R_1} c_{rm} \cdot s_{rm} (kval) \rightarrow \min$	(16)
14	время, затраченное на изготав- ление форм, необходимо со- кращать	$\varphi_{14} = \sum_{n=1}^N (\tau_n^{\text{зод}} \cdot q_n^{\text{зод}} + \tau_n^{\text{брак}} \cdot q_n^{\text{брак}}) \rightarrow \min$	(17)
15	время, затраченное на изготав- ление отливок, необходимо сокращать	$\varphi_{15} = \sum_{n=1}^N (t_n^{\text{зод}} \cdot p_n^{\text{зод}} + t_n^{\text{брак}} \cdot p_n^{\text{брак}}) \rightarrow \min$	(18)
16	трудоемкость производствен- ного процесса должна быть ра- циональной	$\varphi_{16} = (\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R c_{rm} \cdot h_m \cdot d_m \cdot w_m -$ $-\sum_{m=1}^M c_{rm} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K t_{nk}^{\text{факт}} \cdot p_n^{\text{факт}}) \rightarrow \min$	(19)

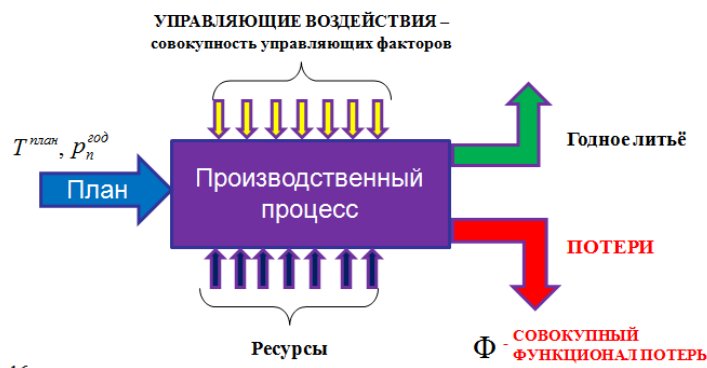


Рис. 2. Структура модели управления ресурсоемкостью производственного процесса

В линейном приближении совокупный функционал потерь имеет вид:

$$\Phi = \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot \varphi_k \rightarrow \min$$

де K - число локальных функций потерь (в нашем случае их 16), α_k - их относительные веса с размерностью $\frac{\text{руб}}{[\text{размерность } \varphi_k]}$ и значениями, определяемыми экспертно. Соотношения (веса) сформулированных критериев (в данном случае их роль играют локальные функции потерь) определяются методом экспертных.

Рассматриваемая задача оказывается не только многопараметрической, но и многокритериальной, и решается методом линейной свертки критериев. В качестве критериев рассматриваются следующие: сокращение затрат металла, сокращение затрат формовочных материалов, сокращение затрат электроэнергии, сокращение затрат воды, сокращение длительности производственного процесса и сокращение количества персонала. Соотношения критериев было определено методом экспертных оценок ($\omega_1^{\text{норм}} = \omega_2^{\text{норм}} = 0,44$, $\omega_3^{\text{норм}} = \omega_4^{\text{норм}} = \omega_5^{\text{норм}} = 0,04$, $\omega_6^{\text{норм}} = 0,00061$). В рамках каждой группы функций потерь ресурсов относительный вес распределяется равномерно). Таким образом, получаем модель производственного процесса изготовления литых заготовок для оценки влияния управляющих воздействий (21):

$$\begin{cases} \Phi = \sum_{k=1}^{16} \alpha_k \varphi_k \rightarrow \min \\ p_n^{\text{год}} \geq p_n^{\text{план}} \\ \sum_{n=1}^N t_n \leq T^{\text{план}} \end{cases} \quad (21)$$

Решением системы (21) являются наборы параметров $(\xi_1^0, \dots, \xi_m^0)$, при которых совокупный функционал потерь Φ достигает минимального значения Φ^0 :

$$\Phi^0 = \Phi(\xi_1^0, \dots, \xi_m^0) \quad (22)$$

Этот набор параметров формируется под влиянием управляющих воздействий. Поскольку набору ξ_i однозначно соответствуют измеряемые величины, то можно утверждать, что при значениях параметров $(\xi_1^0, \dots, \xi_m^0)$ будет обеспечена минимальная ресурсоемкость производственного процесса изготовления литых заготовок. Управляющие воздействия на модель

соответствуют организационно-техническим мероприятиям по снижению ресурсоемкости.

В ходе моделирования определяются основные характеристики производственного процесса: требуемое количество металла P^M , формовочного материала $P_h^{\text{фм}}$, электроэнергии $P^э$, воды $P^в$, персонала P^n , времени $P^{\text{вп}}$ для производства фактического количества заготовок равного плановому с учетом потерь.

Проверка модели на адекватность проводилась путем сопоставлением результатов моделирования при значении результирующих параметров соответствующих реальным значениям действующего литейного производства авиастроительного предприятия. Исследуемый период составлял 1 год. Были получены фактические данные по затратам рассматриваемых типов ресурсов: металла, формовочного материала, электроэнергии, воды, персонала и времени. Известные организационные, технические и технологические условия определяют значения параметров производственного процесса. В результате моделирования с известными значениями параметров производственного процесса за исследуемый период $(\xi_1^*, \dots, \xi_m^*)$ при которых совокупный функционал потерь Φ достигает своего текущего (действительного) значения Φ^* определяются «модельные» значения затрат ресурсов. Модельный эксперимент проводился 12 раз, что соответствует производственным данным за каждый месяц. В результате моделирования были получены значения показателей затрат ресурсов: количество металла P^M с вероятностью 93,77% соответствует реальному потреблению металла в производственном процессе; количество формовочного материала $P_h^{\text{фм}}$ с вероятностью 97,37% соответствует реальному потреблению формовочного материала в производственном процессе, электроэнергии $P^э$ с вероятностью 94,81% соответствует реальному потреблению электроэнергии в производственном процессе; количество воды $P^в$ с вероятностью 97,64% соответствует реальному потреблению воды в производственном процессе; количество персонала P^n с вероятностью 98,2% соответствует реальному потреблению персонала в производственном процессе; количество времени $P^{\text{вп}}$ с вероятностью 95,83 % соответствует реальному потреблению времени в производственном процессе.

Полученные данные свидетельствуют о том, что разработанная модель адекватна реальному производственному процессу, что позволяет проводить на ней

эксперименты по снижению ресурсоемкости производственного процесса за счет управляющих воздействий.

Рекомендации по совершенствованию производственного процесса на основе результатов моделирования. С использованием представленной модели проведено исследование влияния различных организационно-технических мероприятий на ресурсоемкость производственного процесса, причем одно и то же требуемое значение ресурсоемкости может быть обеспечено реализацией различных мероприятий. На основе моделирования была проведена оценка влияния различных управляющих воздействий на затраты ресурсов в производственном процессе.

Например, применение систем моделирования и анализа процесса литья позволяет сократить ресурсоемкость производственного процесса следующим образом. Затраты металла из-за риска производства бракованных отливок путем оптимизации литниково-питающей системы и предварительной отработки технологического процесса на модели сокращаются на 10%. Кроме того сокращаются затраты остальных видов ресурсов, которые были связаны с переделкой бракованных отливок: формовочного материала на 7%, электроэнергии на 3%, воды на 3% и персонала на 5%. Длительность производственного процесса сокращается на 14 часов 17 минут за счет сокращения длительности этапа КТПП на 25%, исключения необходимости изготовления пробных отливок и сокращения времени на переделку бракованных заготовок. Кроме того, любое мероприятие, в результате которого происходит снижение риска производства бракованных отливок имеет аналогичный эффект.

Была проведена апробация разработанной модели на основе оценки двух сценариев снижения ресурсоемкости для литейного цеха АО «Авиастар-СП».

Сценарий № 1 предусматривает:

- 1) Повышение квалификации персонала (для обучения работы с системами моделирования и анализа процесса литья);
- 2) Применение систем моделирования и анализа процесса литья;
- 3) Контроль качества формовочной смеси;
- 4) Усиление контроля руководства на этапе формовки.

Сценарий № 2 предусматривает:

- 1) Повышение квалификации персонала (тех, кто готовит сплав и осуществляет заливку форм);
- 2) Контроль соблюдения температурных режимов;
- 3) Применение CAD систем;
- 4) Применение систем автоматизированного проектирования технологических процессов;
- 5) Планирование загрузки плавильного оборудования.

В результате моделирования было установлено, что первый сценарий обеспечивает снижение совокупного функционала потерь на 12%, а второй на 16%.

Выводы: разработана и исследована математическая модель производственного процесса изготовления литых заготовок со стохастическими параметрами, оценивающая влияние управляющего воздействия на снижение ресурсоемкости производственного процесса, результатом применения которой является определение минимального объема ресурсов необходимых для производства планового количества заготовок в исследуемом периоде в существующих организационных, технических и технологических условиях. Предложенный подход может быть использован при организации (реорганизации) производственного процесса изготовления литых заготовок на предприятиях судостроения, автомобилестроения, машиностроения. Разработанная модель после соответствующей адаптации к выбранной предметной области может применяться для исследования других производственных процессов предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Турилова, К.К. Точка отсчета эффективности литейного производства. Где она? // Литейное производство. 2009. №12. С. 25-28.
2. Стратегия развития ОАО «ОАК» до 2025 г. (материалы для опубликования) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.uacrussia.ru/upload/UAC_Strategy.pdf, свободный (Дата обращения 30.12.2014)
3. Ермаков, И.Н. Ресурсосберегающие принципы в литейном производстве // Вестник ЮУрГУ. Серия металлургия. 2012. № 39. С. 139-141
4. Полянсков, Ю.В. Способ организации заготовительного производства на авиастроительном предприятии / Ю.В. Полянсков, О.Ю. Левкина, Д.Ю. Шабалкин // Вестник МГТУ «СТАНКИН» 2014. №3 (30). С. 102-106.

MINIMIZATION OF RESOURCE INTENSITY OF CAST BILLETS PRODUCTION AT AIRCRAFT MANUFACTURING ENTERPRISE ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODEL

© 2016 Yu.V. Polyanskov, D.Yu. Shabalkin, O.Yu. Levkina

Ulyanovsk State University

The mathematical model of assessment the resource intensity of cast billets production is presented in article. The assessment of influence of managing impact on model is carried out. Recommendations about improvement of castings production for ensuring the required values of resource intensity are submitted.

Key words: *mathematical model, casting, production, resource intensity, risks, losses functional*

Yuriy Polyanskov, Doctor of Technical Sciences, Professor, President.

E-mail: polyanskoyuv@ulsu.ru;

Dmitriy Shabalkin, Candidate of Physics and Mathematics, Associate

Professor. E-mail: shabalkindyu@gmail.com;

Olga Levkina, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer.

E-mail: olenka_levkina@mail.ru