

Б.Н. Прусс, В.А. Романов, Я.С. Прозоров, О.Ю. Плескачева

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОГРАЖДЕНИЙ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ КАМЕР, СОКРАЩАЮЩИХ ТЕПЛОПОТЕРИ

*В работе изложена теория расчета теплотерь через ограждения лесосушительных камер. Описано программное обеспечение для компьютерного моделирования процесса передачи тепловой энергии через ограждения лесосушительной камеры, состоящих из различных теплоизоляционных материалов для расчета теплотерь во время сушки пиломатериалов. Экспериментально подтверждена эффективность использования современных теплоизоляционных материалов для сокращения тепловых потерь при сушке пиломатериалов.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, конструкции ограждений, лесосушительные камеры, теплотери.

B.N. Pruss, V.A. Romanov, Y.S. Prozorov, O.U. Pleskacheva

## COMPUTER MODELING OF THE STRUCTURE OF FOREST DRYING CHAMBERS, REDUCING HEAT LOSS

*The paper presents the theory of calculating heat loss through the fences of timber drying chambers. The software for computer modeling of the process of transferring heat energy through the fences of the drying chamber, consisting of various heat-insulating materials, for calculating heat losses during drying of sawn timber is described. The efficiency of the use of modern heat-insulating materials to reduce heat losses during drying of sawn timber has been experimentally confirmed.*

**Keywords:** computer modelling, fencing structures, timber drying chambers, heat loss.

### Введение

Сушка – обязательная часть технологического процесса выработки пиломатериалов. Непросушенные пиломатериалы не могут считаться готовой продукцией, подлежащей реализации, а технологический процесс их изготовления – законченным. Влажные пиломатериалы подвержены грибковым заболеваниям и не пригодны для дальнейшей механической обработки и производства из них готовых изделий [1].

Для сушки древесины применяются технологии и оборудование, обеспечивающие сохранение качества древесины и не сопровождающиеся ее механическими повреждениями. В настоящее время известен целый ряд различных способов сушки древесины. Однако наиболее приемлемым способом сушки древесины на деревообрабатывающих предприятиях небольшой мощности большинство специалистов считают конвективный способ сушки в сушильных камерах периодического действия.

Объектом исследования является изучение процессов сушки пиломатериалов с целью снижения их себестоимости путем уменьшения потерь тепловой энергии через ограждения лесосушительных камер.

Задачами исследования являются определение конструкции ограждений лесосушительной камеры, обладающих минимальными теплотерями.

Научной новизной работы является компьютерное моделирование процесса передачи тепловой энергии через ограждения лесосушительной камеры, состоящих из различных теплоизоляционных материалов для расчета теплотерь во время сушки пиломатериалов.

Данное исследование является актуальным. Так как многие лесопильные и деревообрабатывающие предприятия применяют сушку пиломатериалов в стационарных лесосушильных камерах, в процессе которой много тепловой энергии просто улетучивается в атмосферу из-за несовершенства конструкции ограждений лесосушильных камер. Это является большим минусом для предприятий, так как для их успешной экономической деятельности необходимо эффективное использование энергетических и сырьевых ресурсов.

### Методика расчета потерь тепла через ограждения камеры

Потери тепла через ограждения камеры в единицу времени  $Q_{огр}$ , кВт, определяются по формуле

$$Q_{огр} = F_{огр} \cdot k \cdot (t_k - t_0) \cdot c \cdot 10^{-3},$$

где  $F_{огр}$  – площадь поверхности ограждений камеры, м<sup>2</sup>;

$k$  – коэффициент теплопередачи соответствующего ограждения, Вт/м<sup>2</sup>°С;

$t_k$  – температура среды в камере, °С;

$t_0$  – расчетная температура наружного воздуха для зимних и среднегодовых условий, °С;

$c$  – коэффициент, учитывающий высокую температуру в камере,  $c = 1,5-2$ .

Расчет теплопотерь ведется для крайней в блоке лесосушильной камеры.

Расчет потерь тепла рекомендуется вести в следующей последовательности.

Вначале определяются по известным внутренним размерам камеры площади ограждения.

При расчете площади дверей, если неизвестны их размеры следует ориентировочно принять:

– высоту дверей:  $h_{дв} = h_{шт} + 0,2$ , м;

– ширину дверей:

а) при продольной загрузке:  $b_{дв} = b_{шт} + 0,2$ , м;

б) при поперечной загрузке:  $b_{дв} = L_{шт} + 0,2$ , м,

где  $h_{шт}$ ,  $b_{шт}$ ,  $L_{шт}$  – соответственно высота, ширина и длина штабеля, м.

После расчета поверхностей ограждений рассчитываются коэффициенты теплопередачи  $K$ , Вт/м<sup>2</sup>°С, по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи для внутренних поверхностей ограждений, Вт/м<sup>2</sup>°С,

$\alpha_1 = 25$  Вт/м<sup>2</sup>°С;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи для наружных поверхностей ограждений, Вт/м<sup>2</sup>°С, (принимается для наружного воздуха  $\alpha_2 = 23$ , для отапливаемых помещений  $\alpha_2 = 9$ , для не отапливаемых и чердачных помещений  $\alpha_2 = 12$  Вт/м<sup>2</sup>°С);

$S_1, S_2, S_n$  – толщина слоев ограждений, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$  – коэффициент теплопроводности материала соответствующих слоев ограждений, Вт/м°С.

Во избежание конденсации водяных паров сушильного агента на внутренних поверхностях ограждений, коэффициент теплопередачи не должен превышать 0,7 Вт/м<sup>2</sup>°С. Коэффициент теплопередачи перекрытия не должен превышать 0,6 Вт/м<sup>2</sup>°С. Коэффициент теплопередачи пола принимается 0,5 $K_{ст}$ .

Температура среды принимается как средняя между температурой на входе и выходе из штабеля.

Расчетная температура наружного воздуха принимается, исходя из конкретных условий эксплуатации лесосушильных камер. Рекомендуется камеры периодического действия устанавливать внутри отапливаемого помещения. В этом случае температура наружной среды принимается для всех ограждений  $t = (15-20) \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **Анализ утеплителей, применяемых в конструкции стен и крыш сушильных камер**

В современных условиях удорожания топливных ресурсов встает вопрос о выборе качественного теплоизоляционного материала. Лучшим теплоизоляционным материалом для сушильных камер на сегодняшний день, бесспорно, является пенополиуретан (ППУ).

Для полиуретановой теплоизоляции характерно следующее:

- самый низкий коэффициент теплопроводности;
- высокая адгезия к различным материалам;
- термическая прочность;
- низкая плотность;
- низкая паропроницаемость;
- малое водопоглощение;
- антикоррозионная защита;
- устойчивость формы;
- легкость;
- экологическая безопасность;
- долговечность покрытия.

Пенополиуретан – на сегодняшний день самый эффективный утеплитель в мире. Пенополиуретан – технологичный, качественный, уникальный по своим характеристикам, теплоизоляционный материал. Пенополиуретан идеально подходит для утепления и ремонта фасадов зданий с недостаточной теплоизоляцией. Пенополиуретан – лидер по значению термического сопротивления среди других утеплительных материалов. Коэффициент теплопроводности пенополиуретана  $0,025 \text{ Вт/м }^{\circ}\text{C}$ . Ближайший по качеству (но уступающий по технологичности), экструдированный пенополистирол имеет коэффициент теплопроводности  $0,03 \text{ Вт/м }^{\circ}\text{C}$ . На теплопроводность пенополиуретана не влияет влажность, чего не скажешь о других теплоизоляционных материалах. Влагопоглощение пенополиуретана при влажности 98 % за сутки -  $0,04 \text{ %}$  или  $2 \text{ г/м}^2$ . Сэндвич панели на основе пенополиуретана производятся с помощью заливочных машин высокого давления. Образование пенополиуретана происходит при реакции двух жидких компонентов: полиола и полиизоцианата. В результате образуются микрокапсулы, заполненные воздухом, где более 90% ячеек пенополиуретана замкнуты. Если в компоненты для получения пенополиуретана включены антипирены, то пенополиуретан относится к группе трудновозгораемых материалов. Пенополиуретан не поддерживает самостоятельного горения. Если убрать источник горения – пенополиуретан гаснет, не тлеет и не дымит. Физические параметры пенополиуретана стабильны в широком температурном диапазоне от  $-180$  до  $+150$  градусов. Пенополиуретан не токсичен. Пенополиуретан биологически нейтрален, устойчив к микроорганизмам, плесени, гниению. Нет химических причин для разрушения правильно сделанного пенополиуретана. При отсутствии механических повреждений, срок службы пенополиуретана оценивается не менее 25 - 30 лет.

Для сравнения: керамзитовый гравий имеет коэффициент теплопроводности от  $0,12$  до  $0,14 \text{ Вт/м }^{\circ}\text{C}$ , пеностекло или газостекло -  $0,84 \text{ Вт/м }^{\circ}\text{C}$ , маты минераловатные прошивные -  $0,056 \text{ Вт/м }^{\circ}\text{C}$ , пенополистирол -  $0,038-0,042 \text{ Вт/м }^{\circ}\text{C}$ , а пенополиуретаны от  $0,019$  до  $0,035 \text{ Вт/м }^{\circ}\text{C}$ .

Применение пенополиуретана в качестве кровельного материала очень эффективно, благодаря его уникальным свойствам. Покрытие поверхности пенополиуретаном

обеспечивает надежную гидроизоляцию и пароизоляцию кровли, что позволяет сократить расходы на применение дополнительных изоляционных материалов. Материал наносится на поверхность в жидком виде под давлением. Вспениваясь, через 5 – 7 с пенополиуретан затвердевает, принимая форму самой поверхности, не оставляя щелей и пустот. Теплоизоляционный слой из пенополиуретана легкий, не нагружает конструкцию. В то же время, обладая достаточной жесткостью и хорошим сцеплением с поверхностью, пенополиуретан укрепляет конструкцию.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ технико–экономической эффективности при использовании жесткого пенополиуретана и традиционной минеральной ваты.

**Таблица 1 – Сравнительный анализ технико–экономической эффективности при использовании жесткого пенополиуретана и традиционной минеральной ваты**

Показатели	Пенополиуретан	Минеральная вата
Коэффициент теплопроводности, Вт/м °С	0,019-0,035	0,038-0,078
Степень плотности, кг/м <sup>3</sup>	40-160	55-150
Пористость	закрытая	открытая
Диапазон рабочих температур, °С	-160 +180	-40 +120
Влага, агрессивные среды	устойчив	Теплоизоляционные свойства теряются, восстановлению не подлежит
Экологическая чистота	безопасен	аллерген
Фактические тепловые потери	в 1,7 раза ниже нормативных	превышение нормативных после 12 месяцев эксплуатации
Горючесть	трудногорючий	трудногорючая
Эффективный срок службы, лет	25-30	5

### **Компьютерное моделирование процесса передачи тепловой энергии через ограждения камеры**

Для эффективной конструкции ограждений лесосушильных камер в данной работе предлагается провести компьютерное моделирование процесса передачи тепловой энергии через ограждения камеры, состоящих из различных теплоизоляционных материалов. Для этого необходимо разработать специальную программу для расчета потерь тепла через ограждения камеры в процессе сушки пиломатериалов в единицу времени [2].

Для расчета потерь тепла через ограждения, в таблицы на форме ввода данных заносятся наименование и размеры камеры, наименование и толщины слоев ограждений, материалы из которых выполнены ограждения. Форма ввода данных с заполненными таблицами представлена на рис.1.

Также в программе предусмотрены формы коэффициентов и температур для изменения значений: высокой температуры в камере; коэффициента теплоотдачи для внутренних поверхностей ограждений; коэффициента теплоотдачи для наружных поверхностей ограждений; температуры среды в камере; расчетной температуры наружного воздуха для зимних и среднегодовых условий [3].

Результаты расчетов выводятся с помощью формы вычислений, представленной на рис. 2.

С помощью разработанного программного обеспечения сравним толщины теплоизоляционных материалов, которые соответствуют 100 см кирпичной кладки.

Введите наименование и размеры комнаты

Порядковый номер	Наименование комнаты	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Высота двери, м	Ширина двери, м
1	УЛ-1	7	3	5,4	3,2	2

Введите наименование и толщину слоя

порядковый номер	Толщина слоя	Наименование ограждения	Наименование материала
3	0,2	нар. бок. стена	Железобетон
4	0,13	нар. бок. стена	Пенополиуретан
5	0,3	нар. бок. стена	Железобетон
6	0,2	Торцовая стена	Железобетон
7	0,13	Торцовая стена	Пенополиуретан
8	0,3	Торцовая стена	Железобетон
9	0,2	Тор. стена. без дв.	Железобетон
10	0,13	Тор. стена. без дв.	Пенополиуретан
11	0,3	Тор. стена. без дв.	Железобетон
12	0,15	Перекрытие	Железобетон
13	0,2	Перекрытие	Пенополиуретан
14	0,01	Перекрытие	Рубероид, толь
15	0,003	Дверь	Сталь строительная
16	0,003	Дверь	Алюминий
17	0,08	Дверь	Вата минеральная
18	0,005	Дверь	Асбестоцементные плиты

Далее

Рис. 1. Форма ввода данных

Ограждение	Площадь, F	K	Tk	To	Tk-To	Q
Наружная боковая стена	29,92	,177	83	-30	113	1,02
Торцовая стена	10,88	,177	83	-30	113	,37
Торцовая стена без учета площади двери	4,48	,177	83	-30	113	,15
Перекрытие	28,16	,12	83	-30	113	,65
Пол	28,16	,088	83	-30	113	,48
Дверь	6,4	,29	83	-30	113	,36

Расчет

Экспорт в Excel

Рис. 2. Форма с результатами вычислений для зимних условий

При толщине кирпичного ограждения 100 см, его коэффициент теплопередачи равен  $0,71 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ . Затем методом подбора определяем такую толщину других теплоизоляционных материалов, чтобы их коэффициент теплопередачи был примерно равен  $0,71 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ .

Сравнительная характеристика толщин теплоизоляционных материалов, соответствующих 100 см кирпичной кладки приведена в табл.2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика толщин теплоизоляционных материалов, соответствующих 100 см кирпичной кладки

Наименование теплоизоляционного материала	Толщина, см
Пенополиуретан	3,9
Пеноизол	4,7
Пенополистирол	6,1
Базальтовое волокно	6,6
Стекловолоконное волокно (URSA)	7,5
Минеральная вата	8,1
Строительный кирпич	100

Таким образом, пенополиуретан имеет самое низкое значение толщины – 3,9 см, следовательно, является самым экономически выгодным материалом. Пенополиуретан оказался самым «теплым» из известных теплоизоляционных материалов, так как имеет самый низкий коэффициент теплопроводности.

Рассмотрим несколько вариантов конструкций ограждений лесосушильных камер и рассчитаем потери тепла через ограждения камеры по каждому варианту с помощью разработанной программы.

В первом варианте конструкция стен камеры состоит из двух слоев железобетона, между которыми залит пенополиуретан. Толщина наружного слоя железобетона равна 200 мм. Толщина слоя пенополиуретана равна 130 мм. Толщина внутреннего слоя железобетона равна 300 мм. Межкамерные стены имеют одинаковую толщину наружного и внутреннего слоев железобетона, равную 200 мм.

Конструкция перекрытия состоит из железобетонных плит толщиной 150 мм, покрытых пенополиуретаном и рубероидом. Толщина слоя пенополиуретана равна 200 мм.

В табл. 3 представлены результаты расчета потерь тепла через ограждения камеры по первому варианту.

Таблица 3. Результаты расчета потерь тепла через ограждения камеры по первому варианту

Наименование ограждения	Потери тепла через ограждения, кВт
Зимние условия	
Наружная боковая стена	1,02
Торцовая стена	0,37
Торцовая стена без учета площади двери	0,15
Перекрытие	0,65
Пол	0,48
Дверь	0,36
Среднегодовые условия	
Наружная боковая стена	0,71
Торцовая стена	0,26
Торцовая стена без учета площади двери	0,11
Перекрытие	0,46
Пол	0,33
Дверь	0,25

Во втором варианте используем параметры конструкции ограждений сборно – металлической камеры УЛ – 1, которые показаны на рис. 3.

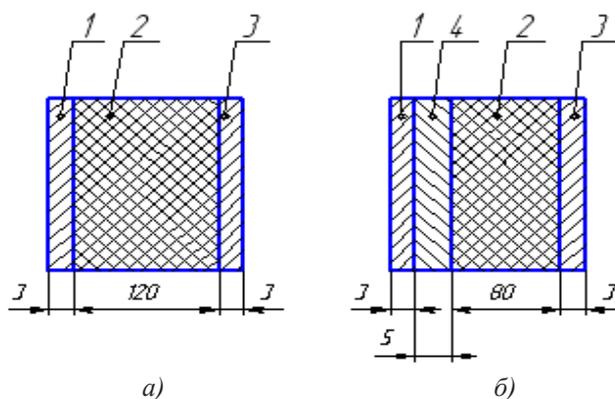


Рис. 3.Схема многослойных ограждений сборно-металлической камеры УЛ – 1: а- стена; б- дверь; 1 – сталь; 2 – утеплитель; 3 – алюминий; 4 – листовая асбест

Аналогично первому варианту рассчитаны потери тепла через ограждения камеры по второму варианту. В табл. 4 представлены результаты расчета потерь тепла через ограждения камеры по второму варианту.

Таблица 4. Результаты расчета потерь тепла через ограждения камеры по второму варианту

Наименование ограждения	Потери тепла через ограждения, кВт
Зимние условия	
Наружная боковая стена	7,84
Торцовая стена	1,68
Торцовая стена без учета площади двери	1,1
Перекрытие	2,18
Пол	1,09
Дверь	0,81
Среднегодовые условия	
Наружная боковая стена	5,51
Торцовая стена	1,18
Торцовая стена без учета площади двери	0,77
Перекрытие	1,53
Пол	0,77
Дверь	0,57

Более наглядно разница в потерях тепла по вариантам показана на рис.4.

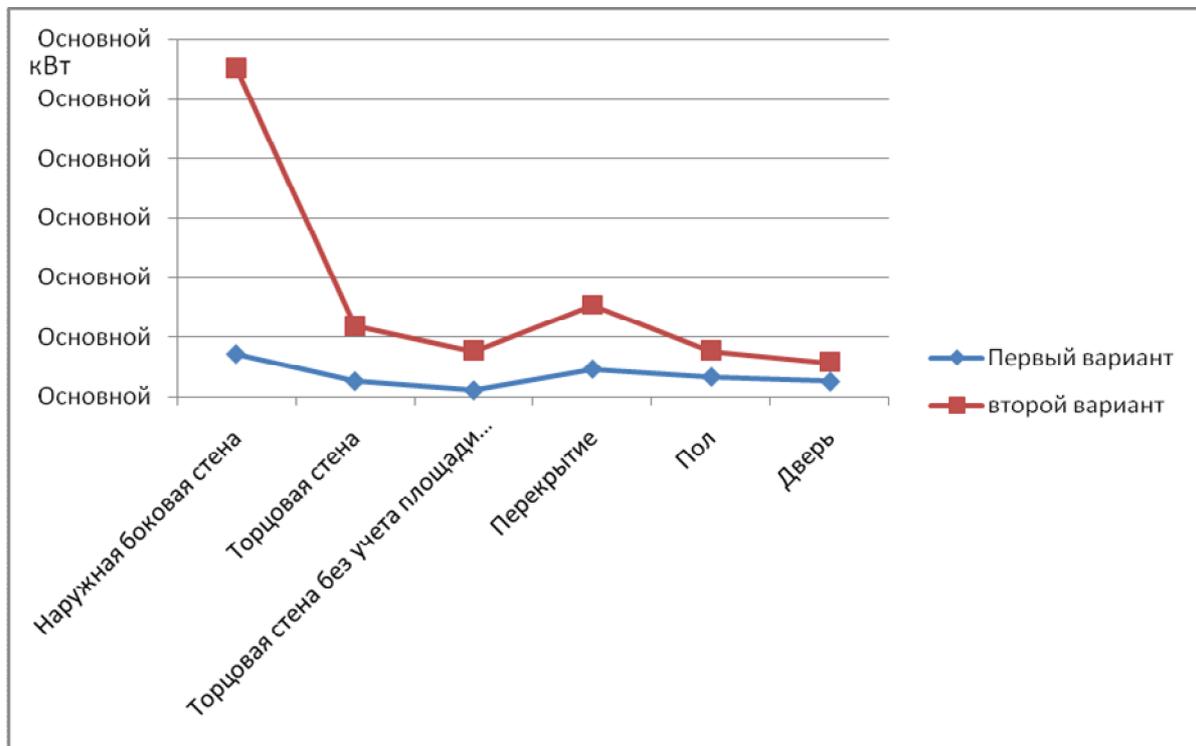


Рис.4. Графики, отражающие потери тепла через ограждения камер по вариантам

Как видно на рис.4 конструкция ограждений лесосушильной камеры по первому варианту более эффективна.

### Выводы

По полученным результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- при проектировании ограждений лесосушильных камер необходимо использовать современные теплоизоляционные материалы;
- наиболее эффективным теплоизоляционным материалом является пенополиуретан;
- компьютерное моделирование процесса передачи тепловой энергии через ограждения лесосушильной камеры, состоящих из различных теплоизоляционных материалов позволяет быстро подобрать конструкцию ограждений камеры, обеспечивающую минимальные теплотери во время сушки пиломатериалов.

### Список литературы:

1. Баланцева, Н.Б. Совершенствование метода расчета конвективной сушки пиломатериалов / Н.Б. Баланцева, В.И. Мелихов, О.А. Калиничева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – №4. – С. 132-139.
2. Лукаш, А.А. Интенсификация процесса сушки оцилиндрованных бревен / А.А. Лукаш, Е.С. Гришина // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2014. – №2. – С. 86-93.
3. Автоматизированный технологический расчет камер для сушки пиломатериалов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610401 Российская Федерация / Б.Н. Прусс, В.А. Романов, Я.С. Прозоров. – №2019667123; заявл. 23.12.2019; опубл. 14.01.2020, Бюл. № 1. – 1 с.

### References:

1. Balanceva, N.B. Sovershenstvovanie metoda rascheta konvektivnoj sushki pilomaterialov / N.B. Balanceva, V.I. Melihov, O.A. Kalinicheva // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. – 2018. – №4. – S. 132-139.
2. Lukash, A.A. Intensifikacija processa sushki ocilindrovannyh breven / A.A. Lukash, E.S. Grishina // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. – 2014. – № 2. – S. 86-93.
3. Avtomatizirovannyj tehnologicheskij raschet kamer dlja sushki pilomaterialov: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2020610401 Rossijskaja Federacija / B.N. Pruss, V.A. Romanov, Ja.S. Prozorov. – № 2019667123; zajavl. 23.12.2019; opubl. 14.01.2020, Bjul. № 1. – 1 s.

*Статья поступила в редколлегию 15.10.2020.*

*Рецензент: канд. биол. наук, доц.,*

*Брянский государственный технический университет*

*Кузьменко А.А.*

*Статья принята к публикации 25.11.2020.*

### Сведения об авторах

#### **Прусс Борис Наумович**

к.т.н., доцент кафедры информационных технологий  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-  
технологический университет»  
E-mail: prussbor@gmail.com

#### **Романов Виктор Александрович**

к.т.н., доцент кафедры технологии деревообработки  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-  
технологический университет»  
E-mail: vromanov62@mail.ru

#### **Прозоров Ярослав Сергеевич**

к.т.н., главный инженер по разработке  
ПАО "Сбербанк"  
E-mail: yprozorov@gmail.com

#### **Плескачева Ольга Юрьевна**

к.пед.н., доцент кафедры прикладной механики и  
физики ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
инженерно-технологический университет»  
E-mail: pleskacheva@inbox.ru

### Information about authors:

#### **Pruss B.N.**

candidate of technical Sciences, docent of the Department  
of Information Technologys of the Bryansk State  
Technological University of Engineering  
E-mail: prussbor@gmail.com.

#### **Romanov V.A.**

candidate of technical Sciences, docent of the Department  
of Wood working Technology of the Bryansk State  
Technological University of Engineering  
E-mail: vromanov62@mail.ru

#### **Prozorov Ya.S.**

candidate of technical Sciences,  
Chief Development Engineer of PJSC Sberbank  
E-mail: yprozorov@gmail.com

#### **Pleskacheva O.Yu.**

candidate of pedagogical Sciences ,docent of the  
Department of Applied Mechanics and Physics of the  
Bryansk State Technological University of Engineering,  
E-mail: pleskacheva@inbox.ru