

## Исследование свойств модифицированной древесины

*С.Н. Погорелов, О.В. Финаева*

*Южно-Уральский государственный университет*

**Аннотация:** В статье представлены результаты исследования свойств древесины различных пород, в том числе модифицированной древесины с различными показателями влажности и возможности использования ее в паркете. Предлагаемый способ модификации заключается в разогреве древесины СВЧ-методом и прессовании до квадратного сечения. Уделяется внимание определению плотности, механических свойств древесины и влияния на них влажности, а именно прочности древесины при сжатии, при статическом изгибе, при скалывании вдоль волокон в тангентальном направлении. Проводится определение статической твердости древесины. Рассматривается вопрос разбухания древесины, исследована кинетика разбухания мозаичных фрагментов паркета из модифицированной древесины. Рекомендовать данный материал к эксплуатации можно при условии создания на поверхности изделия полностью водонепроницаемого покрытия.

**Ключевые слова:** древесина, модифицированная древесина, определение свойств древесины, механические свойства древесины, влияние влажности на свойства древесины, разбухание древесины, паркет.

### Введение

Материалы из древесины широко применяются в строительстве, как для производства несущих конструкций, так и для декоративной отделки. Перспективным направлением удовлетворения потребности строительства в лесоматериалах является комплексная и глубокая переработка древесины. На ее основе создаются различные виды материалов, применяемых для отделки фасадов зданий [1] и внутренней отделки помещений, в том числе, паркетной доски, а также производства мебели и оборудования.

Качество обычной древесины зависит от породы дерева, условий его роста и наличия пороков древесины. Модифицированная древесина имеет улучшенные свойства благодаря специальной обработке, изменяющей ее молекулярную структуру [2, 3]. Исследования различных авторов рассматривают такие способы модификации древесины как химическая пропитка: обработка древесины с помощью полимеров [4-6] для повышения влагостойкости, смеси полимеров с эфирными маслами для усиления

---

антимикробных свойств древесины и расширения сферы ее применения [7], полимеров в смеси с органическими соединениями и биомаслами для повышения плотности и повышения влагостойкости древесины [8], термомодификация [9, 10], механохимическая модификация древесины [11], микроволновая обработка древесины [12].

Целью настоящей работы является определение физико-механических характеристик модифицированной древесины (сосны) для изучения возможности использования ее в паркете.

Предлагаемый способ модификации заключается в разогреве древесины СВЧ-методом и прессовании до квадратного сечения. Этот способ позволяет существенным образом повысить плотность и прочность древесины и, кроме того, предполагает возможное использование в качестве сырья некондиционной сосны, что отвечает отечественной политике ресурсосбережения, рационального природопользования и экологической безопасности производства [13].

## **1. Определение плотности древесины**

Методика определения – в соответствии с ГОСТ 16483.10. Изготавливали образцы призматической формы со строго выдержанными прямыми углами между гранями. Размер 20x20x30 мм. Образцы высушивали до постоянной массы и взвешивали в абсолютно сухом состоянии, с погрешностью до 0.01 г. Результаты: плотность дуба 0,67 г/см<sup>3</sup>, березы 0,63 г/см<sup>3</sup>, модифицированной древесины 0,91 г/см<sup>3</sup>.

## **2. Определение механических свойств древесины и влияния на них влажности**

### **2.1. Определение прочности древесины при сжатии**

Методика определения – в соответствии с ГОСТ 16483.10. Для определения предела прочности при сжатии вдоль волокон образцы

---

изготавливали в форме прямоугольной призмы основанием 20х20 мм и длиной вдоль волокон 30 мм.

Предел прочности вычисляли по формуле (1):

$$\sigma = P_{max}/(ab) \quad (1)$$

где  $P_{max}$  – максимальная нагрузка, Н

$a$  и  $b$  – размеры поперечного сечения, см

Исследовали прочность древесины различных пород с влажностью 0% (высушенные при температуре 105°C) и прочность образцов, выдержанных в эксикаторах с различной относительной влажностью воздуха. В каждой серии испытывали по 5 образцов-близнецов.

Предел прочности при сжатии вдоль волокон образцов в абсолютно сухом состоянии: дуб – 58,7 МПа, береза – 53,2 МПа, сосна – 45,7 , модифицированная древесина 105,8 МПа. Показатели предела прочности при сжатии вдоль волокон образцов древесины при различной влажности воздуха даны в таблице № 1 и таблице № 2.

Таблица № 1

Модифицированная древесина

Влажность воздуха, %	100	50	35	30	25	20	12	8
Предел прочности при сжатии, МПа	23.5	67.5	78.3	91.1	85.2	84.6	84.1	90.0

Таблица № 2

Дуб, береза, сосна

Вид древесины	дуб		береза		сосна	
Влажность воздуха, %	100	30	100	30	100	30
Предел прочности при сжатии, МПа	37.1	41.8	33.2	40.0	22.5	31.3

Полученные результаты показывают, что выдержанная при 30% влажности воздуха модифицированная древесина существенно превосходит прочности березы и дуба.

При увеличении относительной влажности воздуха до 100% и длительном выдерживании образцов, прочность при сжатии модифицированной древесины уменьшается в 4 раза, прочность, березы, дуба и сосны уменьшается значительно меньше.

## 2.2. Определение прочности древесины при статическом изгибе

Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 16483.3. Определяли прочность модифицированной древесины, дуба, березы и сосны на образцах с влажностью 11...13%, и дополнительно, образцов модифицированной древесины выдержанных при 100% относительной влажности воздуха. Образцы имели форму прямоугольных призм сечением 20x20 мм, длиной 300 мм. В каждой серии испытывали по 5 образцов-близнецов.

Предел прочности при изгибе определяли по формуле (2):

$$\sigma_w = 3P_{max}l/(2bh^2) \quad (2)$$

где  $P_{max}$  – максимальная нагрузка, Н

$l$  – расстояние между опорами, мм

$b$  и  $h$  – ширина и высота образца, мм

Результаты определения предела прочности при изгибе образцов с влажностью 11...13%: дуб – 9,8 МПа, сосна – 7,2 МПа, береза – 9,4 МПа, модифицированная древесина 11,6 МПа.

Таким образом, прочность при статическом изгибе модифицированной древесины с влажностью 11...13%, превосходит прочность аналогичных образцов других исследуемых пород.

Прочность при изгибе модифицированной древесины выдержанной при 100% относительной влажности воздуха составила 4,3 МПа.

### 2.3. Определение прочности древесины при скалывании вдоль волокон в тангентальном направлении

Испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 16483.5. Влажность образцов составляла 11...13%. Скорость нагружения 4 мм/мин.

Прочность при скалывании вдоль волокон определяли по формуле (3):

$$\tau = P_{max}/(bl) \quad (3)$$

где  $P_{max}$  – максимальная нагрузка, Н

$l$  – длина площадки скалывания, мм

$b$  – толщина образца, мм

Результаты определения прочности при скалывании:

Модифицированная древесина – 11,6 МПа, береза – 9,6 МПа.

Таким образом, прочность модифицированной древесины при скалывании вдоль волокон превосходит прочность при скалывании березы.

### 2.4. Определение статической твердости древесины

Испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 16483.17.

Изготавливали образцы-кубики с ребром 50 мм, из дуба, березы, сосны и модифицированной древесины. Влажность образцов 11...13%. В соответствии с ГОСТ пуансон вдавливали на глубину 5,64 мм. При испытаниях раскалывания образцов не наблюдалось. Твердость пород древесины определяли по результатам 5 испытаний, результаты указаны в таблице № 3.

Рассчитывали статическую твердость по формуле (4):

$$H_w = P/(\pi r^2) \quad (4)$$

Где  $P$  – нагрузка при вдавливании пуансона, Н

$r$  – радиус полусферы пуансона, мм

Таблица № 3

Результаты определения статической твердости

Порода	Твердость древесины на поверхности торцового разреза, Н/мм <sup>2</sup>	Твердость древесины на поверхности тангентального разреза, Н/мм <sup>2</sup>
Дуб	64...74	56...58
Береза	34...36	44...54
Сосна	13...16	11...14
Модифицированная древесина	82...86 (66...76)*	66...80

\*- 82...86 – центральная часть образца  
66...76 – остальная часть образца

Таким образом, твердость модифицированной древесины превосходить твердость дуба, березы и сосны как на торцовом разрезе, так и на тангенциальном. По торцовой твердости, центральная часть образца модифицированной древесины относится к группе очень твердых пород, остальная часть – к группе твердых пород.

## 2.5. Определение разбухания древесины

Определение величин линейного и объемного разбухания древесины проводили по методике ГОСТ 16483.35. Образцы модифицированной древесины изготавливали в форме четырехгранной прямоугольной призмы размером 20x20x30 мм. Перед испытанием образцы выдерживали в сушильном шкафу при температуре 103оС. После высушивания до абсолютно сухого состояния образцы измеряли, взвешивали и выдерживали в течение 1 месяца в эксикаторах с различной влажностью воздуха. Результаты определения частичного и полного разбухания древесины приведены в таблице № 4.

Таблица № 4

Показатели частичного и полного разбухания древесины

Относительная влажность воздуха, %	12	30	35	50	100
Влажность образца, %	2	3,5	4,2	6,5	20
Объемное разбухание, %	2,6	7,7	11,1	15	102
Линейное разбухание в радиальном направлении, %	1,6	3,1	3,8	6,9	78,6
Линейное разбухание вдоль волокон, %	0	1,8	1,8	1,9	1,9

Кинетику разбухания древесины определяли на образцах различных размеров: образцы-призмы 20х20х30 мм и образцы – торцевые пластины 30х30х10 мм – дуб, береза, сосна и модифицированная древесина (МД). Предварительно высушенные образцы выдерживали в эксикаторах с относительной влажностью воздуха 100% в течение 4, 5 и 12 суток. Результаты представлены в таблице № 5.

Полученные результаты показывают, что при достаточно длительном времени выдерживания образцов (12 сут.) величина линейного разбухания модифицированной древесины намного превосходит величины разбухания дуба, березы и сосны, при практически одинаковой влажности древесины.

Таблица № 5

Кинетика разбухания древесины

Образцы	Вид древесины	Параметры	Время выдерживания		
			4 сут.	5 сут.	12 сут.
Призмы 20x20x30 мм	Дуб	Влажность образцов, %	12,0	14,4	19,2
		Объемное разбухание, %	5,1	8,5	10,2
		Линейное разбухание, %			
		-в радиальном направлении	2,4	2,4	4,7
		-вдоль волокон	0,1	0,1	0,1
	Береза	Влажность образцов, %	5,2	16,7	20,8
		Объемное разбухание, %	10,7	10,8	10,9
		Линейное разбухание, %			
		-в радиальном направлении	4	4	6
		-вдоль волокон	0,1	0,1	0,1
	Сосна	Влажность образцов, %	16,3	17,4	21,9
		Объемное разбухание, %	12,1	12,3	2,7
		Линейное разбухание, %			
		-в радиальном направлении	5	5	7
		-вдоль волокон	0,1	0,1	0,1
	МД	Влажность образцов, %	1,7	12,8	9,1
		Объемное разбухание, %	1,9	2,6	8,6
		Линейное разбухание, %			
		-в радиальном направлении	10,2	15,8	29,4
		-вдоль волокон	0,1	0,1	0,1
Торцевые пластины 30x30x10 мм	МД	Влажность образцов, %	3,6	4,8	6,0
		Объемное разбухание, %	40,8	7,3	8,1
		Линейное разбухание, %			
		-в радиальном направлении	24,7	26,3	32,3
		-вдоль волокон	0,1	0,1	0,1



## 2.6. Определение кинетики разбухания мозаичных фрагментов паркета из модифицированной древесины

Кинетику разбухания определяли на фрагментах паркета различной толщины. Образцы – торцевые пластины размером 70x70x10 мм и 70x70x5 мм, выдерживали при 100% относительной влажности воздуха в течение непродолжительного времени и измеряли величину разбухания. Результаты представлены в таблице № 6.

Таблица № 6

Кинетика разбухания паркета

Образцы размер	Параметр	Время выдерживания				
		2 час.	4 час.	6 час.	1 сут	3 сут
70x70x5 мм	Объемное разбухание, %	23	27,9	31,6	54,2	82,9
	Линейное разбухание в радиальном направлении, %	14	16,6	18,9	26,4	35,3
70x70x10 мм	Объемное разбухание, %	1,6	3,3	4,7	30,2	73,7
	Линейное разбухание в радиальном направлении, %	0,7	1,4	2,3	15,9	36,2

Полученные результаты показывают, что фрагменты паркета из модифицированной древесины очень активно поглощают влагу из воздуха. Даже кратковременное пребывание в среде насыщенного водяного пара приводит к появлению линейных и объемных деформаций разбухания. При кратковременном пребывании (до 1 суток) фрагментов в среде пара огромное влияние на величины деформаций оказывает толщина образца.

### Заключение

**Плотность.** Плотность сосны при предлагаемой технологии модифицирования древесины существенно повышается и превосходит

плотность дуба – одной из наиболее плотных пород произрастающих в России.

**Статическая твердость.** Обычная сосна относится по твердости к группе мягких пород, модифицированная сосна – к группе твердых пород. Сердцевинная часть образца спрессовывается более плотно и относится к группе очень твердых пород (представители – кизил, самшит). Твердые породы труднее обрабатываются, но зато лучше удерживают шурупы, обладают повышенными износостойкостью и вязкостью, ударной твердостью.

**Прочность при сжатии.** Прочность древесины на сжатие вдоль волокон в 4...6 раз больше ее прочности поперек волокон. Поэтому, с точки зрения сжимающих нагрузок, фрагменты паркета в виде торцевых пластин являются предпочтительными. Прочность при сжатии вдоль волокон модифицированной древесины практически равна прочности дуба.

**Прочность при скалывании.** Прочность при скалывании является, вероятно, наиболее уязвимой и, следовательно, наиважнейшей прочностной характеристикой для предлагаемого вида паркета. Предел прочности при скалывании вдоль волокон для основных древесных пород составляет 6...12 МПа. Прочности при скалывании модифицированной древесины составляет 10...13 МПа.

**Усушка и разбухание.** Усушка древесины происходит за счет удаления связанной влаги из стенок клеток, т.е. если влажность древесины становится меньше предела гигроскопичности, то усушка достигает максимального значения. Предлагаемый способ модификации древесины (СВЧ технология) позволяет избежать нарушений структуры связанных с усушкой. При увлажнении древесины до достижения ею предела гигроскопичности стенки древесных клеток утолщаются, разбухают, что приводит к увеличению размеров и объема деревянных изделий.

---

Проведенные эксперименты по определению кинетики разбухания показывают, что модифицированная древесина является высокочувствительной к изменению влажности окружающей среды. Величина линейного разбухания до 5 раз превосходит аналогичную величину у пород традиционно используемых для паркета – березы и дуба. Установлено, что при кратковременном пребывании фрагментов паркета из модифицированной древесины в среде насыщенного водяного пара решающее влияние оказывает толщина образца. Так, при увеличении толщины фрагмента от 5 до 10 мм относительная величина объемных деформаций уменьшилась почти в 15 раз. Тем не менее, образцы толщиной 10 мм уже через 2 часа нахождения в среде водяного пара имели объемное разбухание около 1.5%, что безусловно приведет к короблению паркета. Для предотвращения коробления и растрескивания деревянных изделий принято использовать древесину с той равновесной влажностью, которая будет в условиях эксплуатации. Для паркетных изделий влажность древесины не должна превышать 8 %. При этом, традиционно паркетные изделия покрывают лаком. Толщина лаковой пленки не менее 60 мкм, качество лакового покрытия не ниже 3 класса.

Исследуемый паркет из модифицированной древесины особо чувствителен к изменению влажности, поэтому рекомендовать данный материал к эксплуатации можно при условии создания на поверхности изделия полностью водонепроницаемого покрытия (гидрофобизация поверхности).

### Литература

1. Линьков Н.В. Особенности применения клееной древесины в оформлении фасадов общественных зданий // Инженерный вестник Дона. 2020. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6572](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6572).

2. Михеевская М.А., Платонов А.Д., Снегирева С.Н., Курьянова Т.К., Киселева А.В., Первакова Е.А. Теоретические основы технологии получения модифицированной древесины // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4855](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4855).

3. Шамаев В.А. Получение модифицированной древесины химико-механическим способом и исследование ее свойств // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5. № 4. С. 177-187.

4. Мовнин М.С., Каплунов О.Е., Цой Ю.И. Ленинградская ордена Ленина лесотехническая академия им. С.М. Кирова и Центральный научно-исследовательский институт механической обработки древесины. Модификация древесины. Авторское свидетельство SU 577130 A1. СССР. В27К 5/06 + В27К 3/52. 2380595 05.07.1976. 25.10.1977. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=39920114](http://elibrary.ru/item.asp?id=39920114).

5. Гончаров Ю.А., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Экспериментальные исследования процесса пропитки древесины сосны в поле центробежных сил с учетом соотношения зон ранней и поздней древесины // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2499](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2499).

6. Коляганова О.В., Рысухина А.А., Груданова А.Д., Брюзгина Е.Б., Климов В.В., Брюзгин Е.В., Навроцкий А.В., Новаков И.А. ВолГТУ Способ модификации древесины. Патент на изобретение RU 2764926 C1. Россия. В27К 3/00. 2021112433. 29.04.2021. 24.01.2022. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=47795242](http://elibrary.ru/item.asp?id=47795242).

7. Nana Zhang, Ye Zhu, Xiaoxing Yan Effect of Tea Tree Essential Oil@Chitosan Microcapsules on Surface Coating Properties of Pine Wood // Coatings, aug. 2025. URL: [researchgate.net/publication/394595048](https://www.researchgate.net/publication/394595048).

8. Amanaha Sinta, Marthaa Resa and others The Effect of Weathering on Surface Characteristics of Chemically Modified Scots Pine (Pinus Sylvestris) Wood

// Wood Research, nov. 2024. doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.4.611624. URL: researchgate.net/publication/386037617.

9. Овчинникова Т.С. Термомодификация древесины сосны // В сборнике: Научное творчество молодежи - лесному комплексу России. Материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. С. 497-500.

10. Торговников Г., Винден П. The University of Melbourne. Способ микроволновой обработки древесины. Патент на изобретение. RU 2285875 С2. Россия. В27К 5/00 + F26В 3/347 + F26В 9/06. 2004102051/12. 28.05.2002. 10.03.2005. URL: elibrary.ru/item.asp?id=37994295.

11. Тюменцева А.Е., Лопатин А.Ю., Криворотова А.И., Орлов А.А. Изменение свойств модифицированной коры древесины лиственницы // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России. Материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. С. 636-639.

12. Галактионов О.Н., Хюннинен И.А., Давыдов Н.Б. Механохимическая модификация древесины // В сборнике: Научные исследования: теория, методика и практика. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Чебоксары: ООО "Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс", 2017. Т.2. С. 23-25.

13. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011.

### References

1. Lin'kov N.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6572.

---

2. Mikheyevskaya M.A., Platonov A.D., Snegireva S.N., Kur'yanova T.K., Kiseleva A.V., Pervakova Ye.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4855](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4855).
3. Shamayev V.A. Lesotekhnicheskiy zhurnal, 2015. T. 5. № 4. pp. 177-187.
4. Movnin M.S., Kaplunov O.Ye., Tsoy YU.I. Leningradskaya ordena Lenina lesotekhnicheskaya akademiya im. S.M. Kirova i Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut mekhanicheskoy obrabotki drevesiny. Modifikatsiya drevesiny [Wood modification]. Avtorskoye svidetel'stvo SU 577130 A1. SSSR. B27K 5/06 + B27K 3/52. 2380595 05.07.1976. 25.10.1977. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=39920114](http://elibrary.ru/item.asp?id=39920114).
5. Goncharov YU.A., Kunitskaya O.A., Grigor'yev G.V., Dmitriyeva I.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2499](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2499).
6. Kolyaganova O.V., Rysukhina A.A., Grudanova A.D., Bryuzgina Ye.B., Klimov V.V., Bryuzgin Ye.V., Navrotskiy A.V., Novakov I.A. VolgGTU Sposob modifikatsii drevesiny [Wood modification method]. Patent na izobreteniya RU 2764926 C1. Rossiya. B27K 3/00. 2021112433. 29.04.2021. 24.01.2022. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=47795242](http://elibrary.ru/item.asp?id=47795242).
7. Nana Zhang, Ye Zhu, Xiaoxing Yan Effect of Tea Tree Essential Oil@Chitosan Microcapsules on Surface Coating Properties of Pine Wood. Coatings, aug. 2025 URL: [researchgate.net/publication/394595048](https://researchgate.net/publication/394595048).
8. Amanaha Sinta, Martha Resa and others The Effect of Weathering on Surface Characteristics of Chemically Modified Scots Pine (Pinus Sylvestris) Wood. Wood Research, nov. 2024, doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.4.611624. URL: [researchgate.net/publication/386037617](https://researchgate.net/publication/386037617).
9. Ovchinnikova T.S. Nauchnoye tvorчество molodezhi - lesnomu kompleksu Rossii. Materialy XX Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-

tekhnicheskoy konferentsii (Proc. of the XX All-Russian (national) scientific and technical conference). Yekaterinburg, 2024. Pp. 497-500.

10. Torgovnikov G., Vinden P. The University of Melbourne. Sposob mikrovolnovoy obrabotki drevesiny [Method of microwave treatment of wood]. Patent na izobreteniyе. RU 2285875 C2. Rossiya. B27K 5/00 + F26B 3/347 + F26B 9/06. 2004102051/12. 28.05.2002. 10.03.2005. URL: [elibrary.ru/item.asp?id=37994295](http://elibrary.ru/item.asp?id=37994295).

11. Tyumentseva A.Ye., Lopatin A.YU., Krivorotova A.I., Orlov A.A. Izmeneniye svoystv modifitsirovannoy kory drevesiny listvennitsy. V sbornike: Nauchnoye tvorchestvo molodezhi - lesnomu kompleksu Rossii. Materialy XX Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Proc. of the XX All-Russian (national) scientific and technical conference). Yekaterinburg, 2024. Pp. 636-639.

12. Galaktionov O.N., Khyunninen I.A., Davydov N.B. Mekhanokhimicheskaya modifikatsiya drevesiny. V sbornike: Nauchnyye issledovaniya: teoriya, metodika i praktika. Sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (In the collection: Scientific research: theory, methodology and practice. Collection of materials of the III International scientific and practical conference). Cheboksary, 2017. Pp. 23-25

13. Mokhirev A.P., Bezrukikh YU.A., Medvedev S.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. № 2-2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011)

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 20.10.2025**

**Дата публикации: 7.12.2025**