

## Нейро-нечеткое прогнозирование надежности автономной солнечной электрогенерации

*А.В. Ломазов*

*Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва*

**Аннотация:** Работа посвящена проблематике оценки и прогнозирования надежности устройств фотоэлектрической генерации. Целью работы является выявление факторов, влияющих на объем выработки электроэнергии, а также построение моделей и процедур прогнозирования надёжности функционирования панелей в процессе их использования в зависимости от этих факторов. Приведён обзор типов солнечных электрических станций и используемых фотоэлектрических панелей. Выполнен анализ факторов, влияющих на их надёжность, на основании которого построена иерархия нечетко представленных факторов, связанных между собой нечеткими продукционными правилами. Предложено использовать статистическую двухпараметрическую модель Вейбулла для прогнозирования надёжности функционирования панелей. Разработан и программно реализован алгоритм нейро-нечёткой настройки модели прогнозирования надёжности в зависимости от рассмотренных факторов, который может быть использован при создании информационно-аналитических систем поддержки принятия решений при проектировании и управлении эксплуатацией солнечных электрических станций.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, фотоэлектрическая панель, прогнозирование надежности, статистическая модель, нейро-нечеткая сеть.

### Введение

Декарбонизация энергетики предполагает внедрение современных технологий, основанных на сокращении использования ископаемого (уголь, нефть, газ) топлива в пользу ВИЭ – возобновляемых источников энергии (энергия солнца, ветра, воды, а также геотермальная и биоэнергия) [1]. ВИЭ позволяют не только уменьшить техногенное загрязнение атмосферы и снизить негативное влияние парникового эффекта на климатические изменения, но еще и повысить устойчивость социального и экономического развития сельских территорий за счет создания децентрализованных MicroGrid, представляющих собой локальные энергетические сетевые системы, объединяющими потребителей с автономными источниками генерации (как правило, возобновляемой) энергии [2].

Однако, несмотря на несомненные достоинства, использование ВИЭ (и, в частности, солнечной энергетики) связано с большими проблемами и рисками, обусловленными, в т.ч., недостаточным опытом эксплуатации и сомнениями (во многом оправданными) в надежности (понимаемой как способность обеспечить потребителей электроэнергией) ВИЭ.

Целью исследования является выявление факторов, влияющих на объем выработки солнечной электроэнергии, а также построение моделей и процедур прогнозирования надёжности функционирования фотоэлектрических панелей в процессе их использования в зависимости от этих факторов.

### **Типы фотоэлектрических панелей и факторы, влияющие на их надежность**

Солнечные электростанции (СЭС) в зависимости от способа преобразования солнечной энергии в электрическую энергию подразделяется на следующие виды:

- тепловые СЭС (солнечное нагревание вращающего турбину теплоносителя);
- фотоэлектрические СЭС (генерация электрического тока за счёт фотоэлектрического эффекта).

Получившие в настоящее время наибольшее распространение фотоэлектрические СЭС в свою очередь подразделяются по типу используемых солнечных панелей. При этом выделяются:

- монокристаллические кремниевые (mono-Si) панели;
  - поликристаллические кремниевые (poly-Si) панели;
  - тонкоплёночные (TFs) панели;
  - гетероструктурные (HJT – HeteroJunction Technology) панели;
  - перовскитные (PSC) панели.
-

Основные достоинства и недостатки, а также предпочтительное применение рассмотренных типов панелей приведены в таблице 1.

В рамках принятия проектного решения при создании СЭС (кроме выбора типа панелей и их производителей, обеспечивающих требуемое качество) необходимо учитывать факторы, влияющие на надежность функционирования панелей. При этом целесообразно выделить:

- внешние погодноклиматические факторы (общий температурный режим эксплуатации, скачки температур, циклы заморозки-разморозки, повышенная влажность, УФ-излучение), *ExtWath*;

- внешние эксплуатационные факторы (загрязнения, микроповреждения, механические нагрузки и деградация фотоэлектрических свойств в процессе эксплуатации), *ExtExpl*;

- внутренние эксплуатационные факторы (несбалансированность генерации и потребления электроэнергии, неблагоприятное соотношение постоянной и пиковой нагрузки, нагрузка в темное время суток, цикличность нагрузки), *IntExpl*;

- внутренние факторы, связанные с обслуживанием солнечных панелей (периодичность и качество контроля и технического обслуживания панелей и другого оборудования СЭС), *IntMaint*.

Следует отметить, что рассмотренные факторы являются интегральными и при детализации могут быть разбиты на подфакторы:

$$ExtWath : ExtWath_1, ExtWath_2, \dots, ExtWath_i,$$
$$ExtExpl : ExtExpl_1, ExtExpl_2, \dots, ExtExpl_j,$$
$$IntExpl : IntExpl_1, IntExpl_2, \dots, IntExpl_k,$$
$$IntMaint : IntMaint_1, IntMaint_2, \dots, IntMaint_l,$$

где конкретный вид подфакторов определяется, исходя из особенностей условий эксплуатации СЭС.

Таблица № 1.

Типы фотоэлектрических панелей

Тип панелей	КПД	Достоинства	Недостатки	Применение
mono-Si	17-23%	компактность, долговечность (25+ лет), эффективность при слабом освещении и высоких температурах	высокая стоимость, чувствительность к загрязнению поверхности	ограниченная площадь размещения (малые солнечные фермы)
poly-Si	15-18%	долговечность (25+ лет)	для размещения требуются значительные площади, потеря КПД при нагреве	значительная площадь размещения (большие солнечные фермы)
TFs	8-15%	низкий вес, гибкость, эффективность при рассеянном свете и высоких температурах, низкая стоимость	значительная потеря мощности в первые годы эксплуатации, для размещения требуются значительные площади, недолговечность	размещение на нестандартных поверхностях (например, на транспорте)
HJT	22-25%	низкие потери мощности при нагреве, долговечность (30+ лет)	высокая стоимость, сложность производства	премиальный сектор (эффективность и долговечность, несмотря на высокую стоимость)
PSC	до 30%	низкий вес, гибкость, низкая стоимость производства (печатные технологии)	недолговечность, разрушение под воздействием влаги, кислорода, тепла и УФ-излучения	временные решения: электропитание IoT-устройств, портативная электроника, интеграция в текстиль

Тем самым, может быть построена трехуровневая иерархия влияющих на надежность солнечной генерации факторов, где фокус (вершина) иерархии – общий показатель факторов надежности, второй ярус – факторы, а третий ярус – подфакторы (рис.1)

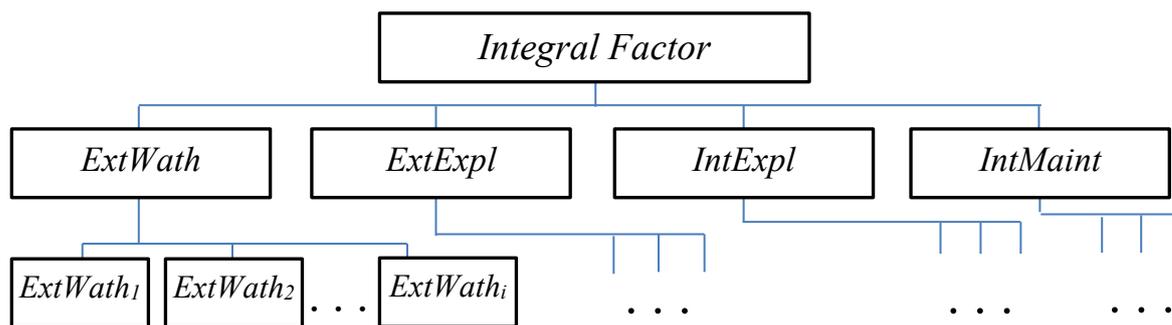


Рис. 1. Иерархия факторов, влияющих на фотоэлектрическую генерацию.

Будем полагать, что значения факторов могут быть количественно оценены экспертами (методом непосредственной количественной оценки, методом средней точки или методом Черчмена-Акофа) в баллах (например, от 0 до 10) или числами в диапазоне от 0 до 1 (что более удобно для дальнейшего анализа), а между показателями второго и третьего яруса (первого и второго) существует количественная функциональная зависимость.

Высокий уровень неопределенности, характерный для экспертного оценивания, делает целесообразным использование аппарата нечетких лингвистических переменных Л. Заде, позволяющих оценить уровни воздействия факторов терминами «низкий», «средний», «высокий» с добавлением лингвистических модификаторов усиления/ослабления (таких как «очень» и «более или менее»), семантика которых определяется нечеткими подмножествами универсума (в данном случае отрезка  $[0, 1]$ ).

Тогда связи между факторами смежных уровней могут быть представлены нечеткими продукционными правилами ЕСЛИ-ТО в форме Мамдани. Например,

ЕСЛИ ( $ExtWath_1$  – «низкий») and ( $ExtWath_2$  – «низкий») and...  
... and ( $ExtWath_i$  – «низкий») ТО ( $ExtWath$  – «низкий»)

## Статистическая модель прогнозирования надежности

Солнечная фотоэлектрическая панель рассматривается как базовый генерирующий элемент СЭС, отказ которого приводит к потере мощности СЭС. Под отказом понимается выход эксплуатационных характеристик устройства за пределы, установленные при его проектировании [3]. Будем полагать, что отказы носят случайный характер и выходная мощность СЭС пропорциональна количеству функционирующих панелей. В этом случае статистическое модельное описание прогнозируемой мощности СЭС в момент времени  $t$  (обозначаемая  $P(t)$ ) может быть представлено формулой

$$P(t) = P_0 \left(1 - \int_0^t f(\tau) d\tau\right) \quad (1)$$

где  $P_0$  – начальная мощность СЭС (мощность в момент времени  $t_0$ ), а  $f(t)$  – плотность распределения вероятности отказов панелей.

При оценке вероятности отказов электронного оборудования (например, [4]) используется экспоненциальное (показательное) распределение

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad \text{при } t \geq 0 \quad \text{и} \quad f(t) = 0 \quad \text{при } t < 0 \quad (2)$$

где  $\lambda$  – среднее число новых отказов в единицу времени. Однако при этом не учитывается рост деградации панелей с течением времени, что делает более целесообразным использование при долгосрочном прогнозировании двухпараметрического распределения Вейбулла [5]

$$f(t) = (k/\sigma)(t/\sigma)^{k-1} \exp(-(t/\sigma)^k) \quad \text{при } t \geq 0 \quad \text{и} \quad f(t) = 0 \quad \text{при } t < 0 \quad (3)$$

При этом будем считать, что коэффициент формы (модуль Вейбулла)  $k > 1$ , что соответствует увеличению интенсивности отказов с течением времени. Распределение Вейбулла можно рассматривать как обобщение экспоненциального распределения: в случае  $k=1$  распределение совпадает с экспоненциальным распределением, т.е. количество отказов постоянно с течением времени (зависит только от длины рассматриваемого временного интервала). При этом коэффициент масштаба  $\sigma = 1/\lambda$ .

## Нейро-нечеткая настройка модели прогнозирования надежности

Использование статистической модели прогнозирования надежности СЭС во многом осложняется трудностями при определении параметров модели с учетом достаточно большого числа типов фотоэлектрических панелей и факторов, влияющих на появление отказов [6], что делает целесообразным применение методологического аппарата теории искусственного интеллекта. Нейро-нечеткая настройка (определение параметров) модели позволяет сочетать удобные для экспертов и пользователей интерпретируемость и логическую прозрачность нечеткого лингвистического анализа [7] с вычислительной эффективностью и способностью обработки неполной информацией, которыми отличаются нейросетевые технологии.

Общая схема процедуры нейро-нечеткой настройки модели приведена на рисунке 1.

Первым этапом процедуры является формирование лингвистических переменных (ЛП), соответствующих факторам (подфакторам), влияющим на надежность функционирования панелей. При этом предполагается, что числовые значения уровней влияния факторов оцениваются экспертами в диапазоне от 0 (минимальное значение фактора) до 1 (максимальное значение фактора) – универсальное множество ЛП, а семантика термов ЛП (например, «очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий»), определяется гауссовыми функциями принадлежности.

Второй этап процедуры предполагает формирование базы знаний в области надежности СЭС в виде системы нечетких продукционных правил ЕСЛИ-ТО, связывающих интегральные факторы (консеквенты) с подфакторами (антецедентами).

---

Третий этап состоит в построении пятислойной нечеткой нейронной сети Такаги-Сугено-Канга (TSK-сети), служащей для определения параметров Вейбулла на основе значений факторов (подфакторов).

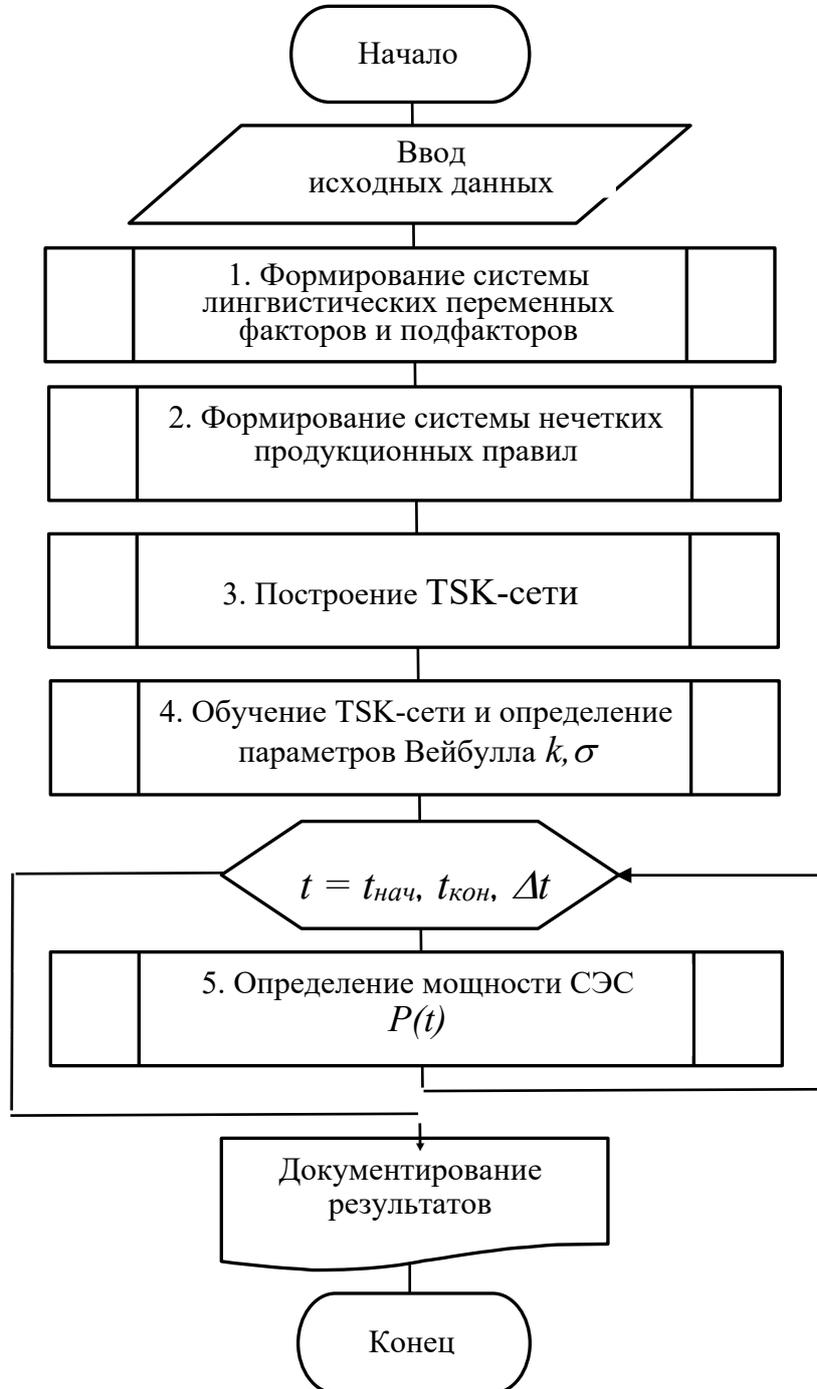


Рис. 2. Блок-схема процедуры нейро-нечеткой настройки модели прогнозирования надежности и определения прогнозируемых значений мощности СЭС

Четвертый этап заключается обучении TSK-сети с использованием обучающей выборки вида:

$$(ExtWath, ExtExpl, IntExpl, IntMaint, k, \sigma)_n \quad n=1,2,\dots,N$$

где входящие в выборку параметры Вейбулла определяются методом наименьших квадратов из выборки:

$$(ExtWath, ExtExpl, IntExpl, IntMaint, P)_n \quad n=1,2,\dots,N$$

Пятый этап состоит в определении параметров Вейбулла с помощью обученной TSK-сети и нахождении значений прогнозируемой мощности в заданные моменты времени на основе прогностической функции (3).

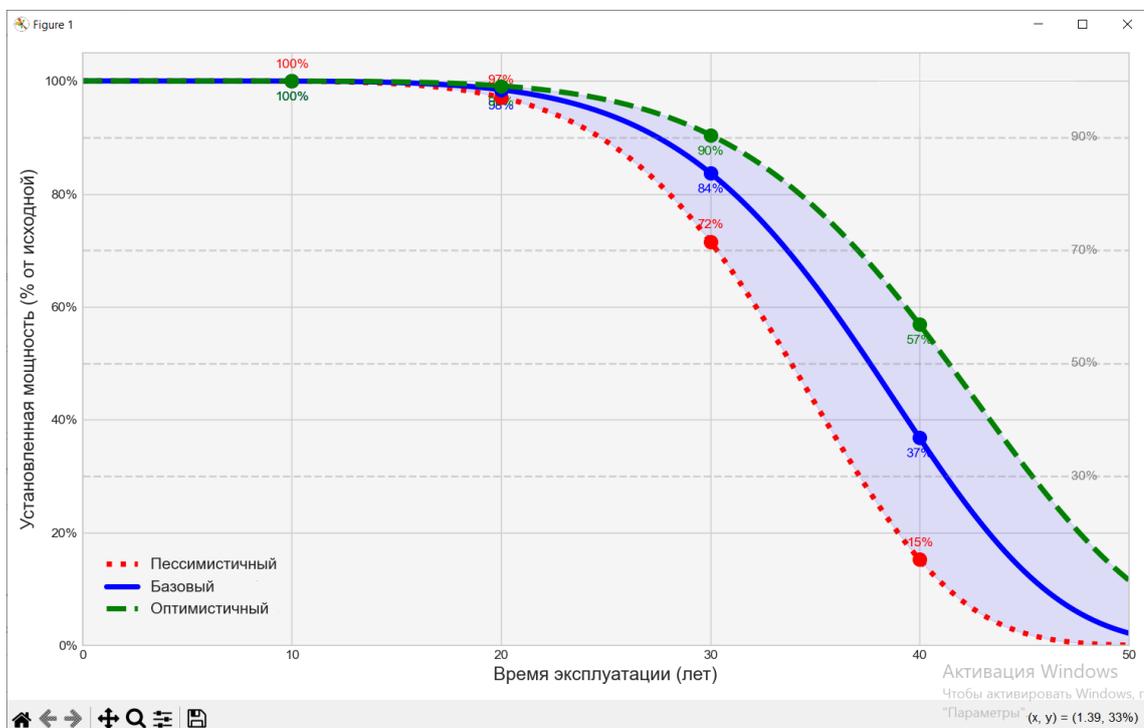


Рис. 3. Прогнозируемая относительная (в процентах к исходной) мощность солнечной панели после нескольких лет эксплуатации

Следует отметить, что с учетом высокого уровня неопределенности факторов, влияющих на прогнозируемые значения мощности фотоэлектрических панелей (и СЭС в целом) целесообразно рассматривать несколько вариантов (оптимистический, базовый и пессимистический) прогнозов, как это показано на рисунке 3 в рамках иллюстративных расчетов.

При этом использовались соответственно оптимистические, базовые и пессимистические экспертные оценки факторов, влияющих на выработку электроэнергии СЭС. Расчеты проводились с помощью разработанного исследовательского прототипа информационно-аналитического обеспечения оценки надежности СЭС, программно реализованного на языке Python с применением библиотек `matplotlib`, `scipy` `numpy` (алгоритмическая компонента) и СУБД SQLite (информационная компонента).

### Заключение

Рассматриваемый в работе подход к прогнозированию надежности солнечных электрических панелей (что во многом определяет надежность СЭС в целом) основан на применении статистической модели Вейбулла. При этом для определения параметров модели предложено использовать нечеткую нейронную TSK-сеть, что позволило учесть погодноклиматические и эксплуатационные факторы, влияющие на деградацию (снижение мощности) фотоэлектрических панелей с течением времени. Разработанная процедура прогнозирования в сочетании с инструментарием многокритериального выбора (например, [9,10]) может быть использована при создании информационно-аналитических систем поддержки принятия решений при проектировании и управлении эксплуатацией СЭС в качестве источников электрогенерации MicroGrid-систем.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-21-00059.*

### Литература

1. Шеина С.Г., Пирожникова А.П. Тенденции развития альтернативной энергетики в странах мира и России // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720).

2. Xing X., Jia L. Energy management in microgrid and multi-microgrid // IET Renewable Power Generation. 2023. 18(15). Pp. 3480-3508.
  3. Папков Б.В., Илюшин П.В., Куликов А.Л. Надёжность и эффективность современного электроснабжения. Нижний Новгород: Изд-во «XXI век». 2021. 160 с.
  4. Литвиненко Р.С., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2016. Т. 1. С. 35-38.
  5. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Бурак И.А. Модели на основе распределения Вейбулла-Гнеденко для описания деградации функциональных параметров изделий электронной техники // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2015. Т. 59, № 3. – С. 109-115.
  6. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 34. С. 56-74.
  7. Zadeh L.A. Is There a Need for Fuzzy Logic? // Information Sciences. 2008. Vol. 178, No. 13. Pp. 2751-2779.
  8. Vetokhin S., Tulekbayeva A., Sabyrkhanov D. Morphological approach in inventive act and management // Industrial Technology and Engineering. 2016. 1 (18). Pp. 89-95.
  9. Ковалёв В.З., Парамзин А.О. Анализ подходов к оптимизации структуры и состава генерирующего комплекса в задачах распределенной генерации // Инженерный вестник Дона. 2022. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7997.
-



10. Вендин А.С., Вохменов С.В., Голованова Е.В., Ломазов А.В., Ломазов В.А. Поддержка принятия решений при выборе проекта автономной электрогенерации для малых производственных предприятий // Инженерный вестник Дона. 2024. № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9351](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9351).

### References

1. Sheina S.G., Pirozhnikova A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720).

3. Papkov B.V., Ilyushin P.V., Kulikov A.L. Nadozhnost' i effektivnost' sovremennogo elektrosnabzheniya [Reliability and efficiency of modern power supply]. Nizhny Novgorod: Izd-vo "XXI Century". 2021. 160 p.

4. Litvinenko R.S., Idiyatullin R.G., Aukhadeev A.E., Litvinenko R.S. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo". 2016. 1. Pp. 35-38.

5. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Burak I.A. Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi. 2015. 59(3). Pp. 109-115.

6. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2020. 34. Pp. 56-74.

9. Kovalev V.Z., Paramzin A.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №11. RL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7997](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7997).

10. Vendin A.S., Vokhmenov S.V., Golovanova E.V., Lomazov A.V., Lomazov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9351](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9351).

**Дата поступления: 5.08.2025**

**Дата публикации: 25.09.2025**