

---

# НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

## SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

### № 2 2026

---

*Журнал «Научное обозрение. Технические науки»  
зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС77-57440  
выдано 27.03.2014.  
ISSN 2500-0799*

**Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,494  
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,260**

*Учредитель, издатель и редакция:  
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*

*Почтовый адрес: 101000, г. Москва, а/я 47  
Адрес учредителя, издателя: 410056, г. Саратов,  
ул. им. Чапаева В.И., д. 56  
Адрес редакции: 410035, г. Саратов,  
ул. Мамонтовой, д. 5*

**Founder, publisher and edition:  
LLC SPC Academy of Natural History,**

**Post address: 101000, Moscow, p.o. box 47  
Founder's, publisher's address: 410056, Saratov,  
56 Chapaev V.I. str.  
Editorial address: 410035, Saratov,  
5 Mamontovoi str.**

*Подписано в печать 29.05.2026  
Дата выхода номера 29.06.2026  
Формат 60×90 1/8*

*Типография  
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,  
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5*

**Signed in print 29.05.2026  
Release date 29.06.2026  
Format 60×90 8.1**

**Typography  
LLC SPC «Academy Of Natural History»  
410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.**

*Технический редактор Доронкина Е.Н.  
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.*

*Распространяется по свободной цене  
Тираж 100 экз. Заказ НО 2026/2*

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

**Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.**



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

С 2014 года издание журнала возобновлено  
Академией Естествознания

**From 2014 edition of the journal resumed  
by Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов  
**Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov**

Редакционная коллегия (Editorial Board)

Н.Ю. Стукова (N.Yu. Stukova)

М.Н. Бизенкова (M.N. Bizenkova)

Н.Е. Старчикова (N.E. Starchikova)

Т.В. Шнуровозова (T.V. Shnurovovozova)

---

***НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ***

***SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES***

***<https://science-engineering.ru>***

***2026 г.***

---



***В журнале представлены научные обзоры,  
статьи проблемного  
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,  
problem and practical scientific articles***

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### Технические науки

#### СТАТЬЯ

##### НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ – ГИДРОЭНЕРГОБАШНЯ

*Мамулашвили Г. Ш., Гургенидзе А. Т.* ..... 5

##### АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

*Зеленин А. С., Астапов В. Н.* ..... 13

##### КОНЦЕПЦИЯ ИНСТРУМЕНТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА С АВТОРАМИ СТАТЕЙ

*Смолянов А. Г., Бурлакова Т. С.* ..... 20

##### ИЗМЕРИТЕЛЬ УРОВНЯ МОЩНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

*Соловьев Д. А., Новиков А. А., Ткачева Е. В., Копейкин Р. Е.* ..... 29

##### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ ЛОПАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ МАШИНЫ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

*Шаповалова С. В.* ..... 43

---

## CONTENTS

### Technical sciences

#### ARTICLES

##### NEW TECHNOLOGY IN THE FIELD OF HYDROPOWER – HYDRO POWER TOWER

*Mamulashvili G. Sh., Gurgenedze A. T.* ..... 5

##### ANALYTICAL REVIEW OF THE RESEARCH OF VULCANIZATION METHODS OF RUBBER PRODUCTS

*Zelenin A., Astapov V.N.* ..... 13

##### THE CONCEPT OF A TOOL FOR INTERACTION BETWEEN THE EDITORIAL STAFF OF A SCIENTIFIC JOURNAL AND THE AUTHORS OF ARTICLES

*Smolyanov A. G., Burlakova T. S.* ..... 20

##### POWER LEVEL METER OF A HIGH-FREQUENCY SIGNAL BASED ON A FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAY

*Solovev D. A., Novikov A. A., Tkacheva E. V., Kopeykin R. E.* ..... 29

##### COMPARATIVE ASSESSMENT OF PADDLE-BLADE VARIANTS FOR A SPECIALIZED WHEELED PROPULSOR OF A HIGH-MOBILITY VEHICLE

*Shapovalova S. V.* ..... 43

СТАТЬЯ

УДК 627.8



CC BY 4.0

**НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ  
ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ – ГИДРОЭНЕРГОБАШНЯ**

**Мамулашвили Г. Ш., Гургенидзе А. Т.**

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: gsmprado@yandex.ru*

Традиционная гидроэнергетика с использованием плотинной технологии является крупнейшим источником возобновляемой энергии. Однако существует ряд проблем, связанных с серьезными нарушениями экосферы: затопление плодородных территорий, нарушение миграции рыб и изменение естественного стока. В поисках альтернативы в статье предлагается рассмотреть новую бесплотинную технологию – гидроэнергобашню (ГЭБ), которая не требует дорогостоящих строительно-монтажных работ по перегораживанию русла. Технология проста в эксплуатации, так как включает два основных строительных элемента – спиральный коллектор для закрутки потока и гиперболическую башню, где формируется устойчивый вихрь. В работе с целью верификации концепции выполнено детальное CFD-моделирование в пакете ANSYS CFX с использованием SST k- $\omega$  модели турбулентности и оценкой сеточной сходимости. Валидация модели проведена путем сравнения профиля тангенциальной скорости с комбинированным вихрем Ранкина (среднеквадратичное отклонение менее 8 %). Энергетический анализ на основе уравнений Бернулли и Навье – Стокса показал, что при расходе 18 м<sup>3</sup>/с и глубине установки 7,5 м, установка способна генерировать 1 МВт и более электрической мощности при полном КПД 0,82. Результатом работы является доказательство того, что мощные вихревые эффекты, создавая высокие локальные скорости в ядре до 38,2 м/с, не формируют существенного дополнительного напора (разрежение не превышает 0,02 м вод. ст.), а обеспечивают устойчивый подъем.

**Ключевые слова:** гидроэнергетика, безнапорная технология, вихревой эффект, гиперболическая башня, спиральный коллектор, CFD-моделирование, уравнение Бернулли

**NEW TECHNOLOGY IN THE FIELD  
OF HYDROPOWER – HYDRO POWER TOWER**

**Mamulashvili G. Sh., Gurgenidze A. T.**

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University”, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: gsmprado@yandex.ru*

Traditional hydropower using dam technology is the largest source of renewable energy. However, there are a number of problems associated with serious violations of the eco-sphere: flooding of fertile areas, disruption of fish migration and changes in natural flow. In search of an alternative, the article proposes to consider a new non-dam technology – the Hydropower Tower (GEB), which does not require expensive construction and installation work to block the channel. The technology is easy to operate, as it includes two main building elements – a spiral collector for twisting the flow and a hyperbolic tower, where a stable vortex is formed. In order to verify the concept, detailed CFD modeling was performed in the ANSYS CFX package using SST k- $\omega$  turbulence model and grid convergence estimation. The model was validated by comparing the tangential velocity profile with the combined Rankine vortex (standard deviation less than 8 %). Energy analysis based on the Bernoulli and Navier-Stokes equations showed that with a flow rate of 18 m<sup>3</sup>/s and a plant depth of 7.5 m, the plant is capable of generating 1 MW or more of electrical power with a full efficiency of 0.82. The result of the work is a proof that powerful vortex effects, creating high local velocities in the core up to 38.2 m/s, do not form a significant additional head (the vacuum does not exceed 0.02 m of water st.), but provide a stable rise.

**Keywords:** hydropower, non-pressure technology, vortex effect, hyperbolic tower, spiral collector, CFD modeling, Bernoulli equation

**Введение**

Гидроэнергетика является крупнейшим источником возобновляемой энергии, однако традиционные плотинные ГЭС связаны с критическими экологическими проблемами, что подтверждается многочисленными исследованиями [1]. В работе предложена альтернативная технология – гидроэнергобашня (ГЭБ), которая использует естественный речной сток без создания водохрани-

лищ [2]. Конструкция включает спиральный коллектор для закрутки потока и гиперболическую башню, в которой происходит ускорение потока за счет эффекта Вентури и вихревого разрежения. Новизна исследования заключается в комбинированном использовании спирального коллектора и гиперболической башни для генерации устойчивого вихревого потока в условиях малого напора, что позволяет минимизировать воз-

действие на экосистемы по сравнению с известными аналогами [3, 4]. В статье представлены результаты CFD-моделирования потока в ГЭБ, на основе которых выполнен энергетический анализ и расчет мощности.

### Материалы и методы исследования

Движение воды в ГЭБ описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии [5, 6]. На рис.1 показан общий вид гидроэнергобашни, установленной на дно течения.

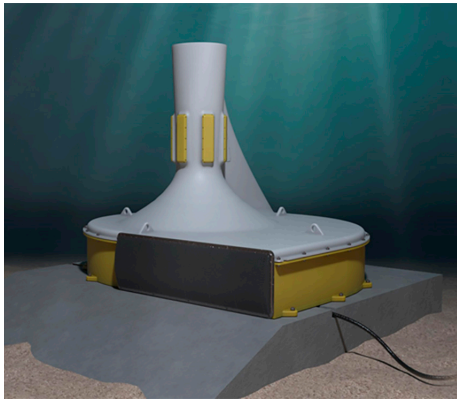


Рис. 1. Общий вид гидроэнергобашни  
Примечание: составлен авторами  
на основе источника [2]

Для установившегося течения невязкой жидкости применяется уравнение Бернулли [7]:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \text{const}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность воды,  $v$  – скорость,  $g$  – ускорение свободного падения,  $z$  – высота. Для учета вязкости и турбулентности используются уравнения Навье – Стокса [8]. Вихревое движение характеризуется циркуляцией скорости  $\Gamma$ . В случае вихревого течения в гиперболической башне подъем воды обусловлен разностью давлений, возникающей при воздействии центробежных сил, что описывается радиальным балансом давления [9, 10]:

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{v_{\theta}^2}{r}, \quad (2)$$

где  $v_{\theta}$  – тангенциальная скорость,  $r$  – радиус вращения. Экспериментальные исследования подтверждают возможность создания значительного разрежения на оси интенсивного вихря [11], что лежит в основе работы предлагаемой установки.

Важно подчеркнуть, что ГЭБ является установкой *кинетического типа*, преобразующей статическое давление, создаваемое глубиной погружения входа, в динамический напор в горловине. Доступный перепад давления  $\Delta p$  определяется глубиной погружения входного сечения коллектора  $h = 7,5$  м относительно свободной поверхности:

$$\Delta p_{\text{теор}} = \rho g h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 7,5 = 73\,575 \text{ Па.}$$

Это давление полностью трансформируется в скоростной напор в горловине башни. Окружающая река *не компенсирует* данное давление, так как входной коллектор гидравлически изолирован от выходного сечения (верхнего среза) стенками башни. Выходное сечение находится в атмосфере, и давление там равно атмосферному. Таким образом, весь перепад давления  $\Delta p$  отрабатывается на тракте «вход коллектора – выходное сечение», что делает его доступным для преобразования в механическую работу.

### Методика численного моделирования

Моделирование проведено для ГЭБ, состоящей из спирального коллектора и гиперболической башни. Основные геометрические параметры (рис. 2):

- диаметр спирального коллектора на входе: 10,6 м;
- длина спирального канала: 18 м;
- диаметр горловины гиперболической башни: 1,4 м;
- высота гиперболической башни: 7,5 м;
- диаметр выходного сечения: 1,8 м.

Для дискретизации области применена неструктурированная тетраэдральная сетка с 10 слоями призматических элементов в пристеночной области для разрешения пограничного слоя (толщина первого слоя 0,01 м). Общее количество элементов: 7,3 млн. Проведен тест на сеточную независимость: при увеличении числа элементов до 10,1 млн изменение массового расхода составило менее 0,05 %, а максимальной скорости в горловине – менее 0,3 %. Расчеты проведены в пакете ANSYS CFX 2023 R1. Использована SST  $k-\omega$  модель турбулентности, рекомендованная для течений с отрывом и закруткой. Граничные условия:

- Вход: задана скорость 2 м/с (нормальная к грани), соответствующая среднему течению р. Невы в районе Ивановских порогов.
- Выход: относительное давление 0 Па.
- Стенки: условие прилипания, шероховатость 0,05 мм.
- Свободная поверхность (верхняя граница расчетной области): условие симметрии (свободного скольжения).

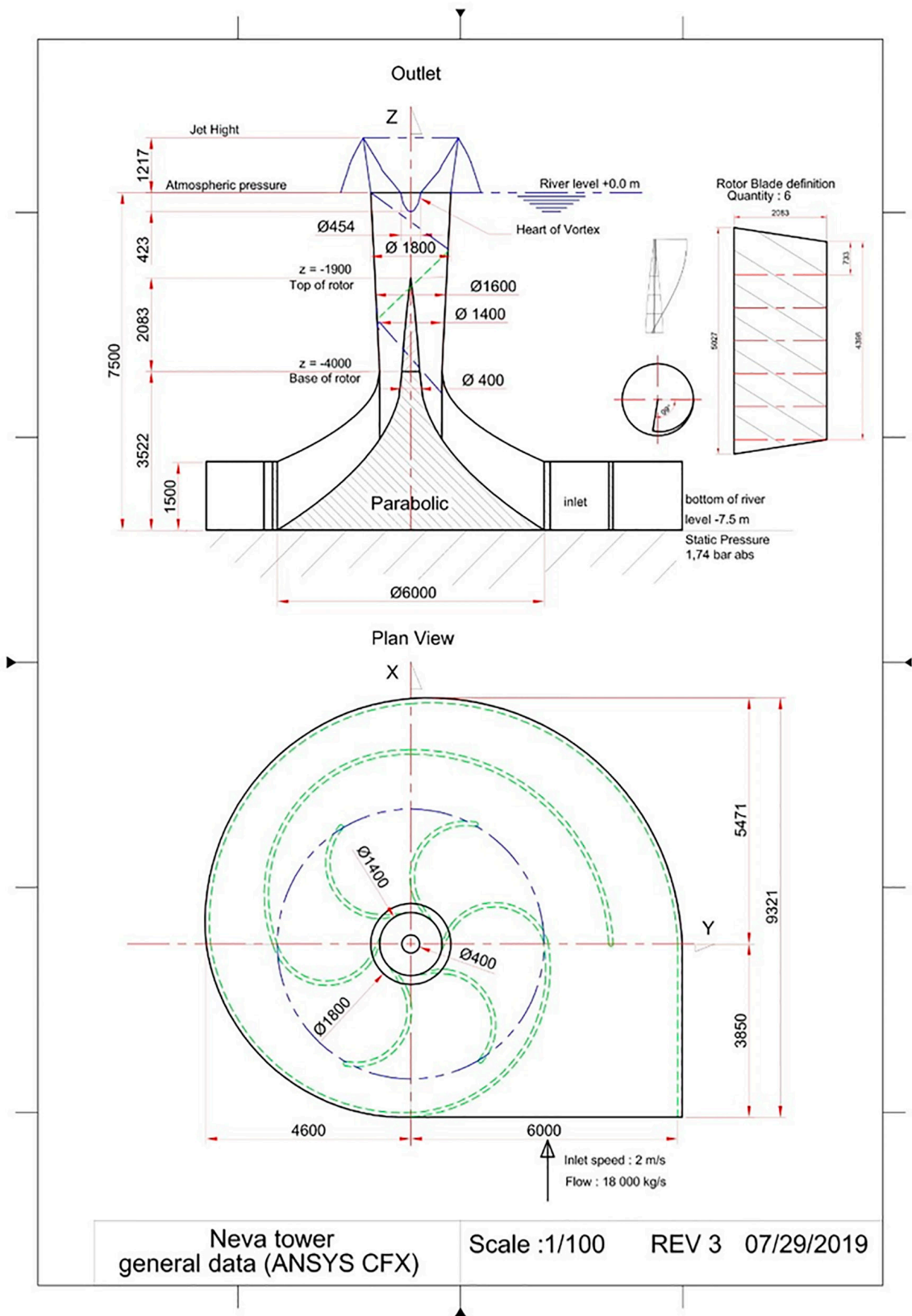


Рис. 2. Геометрическая схема гидроэнергобашни  
Примечание: составлен авторами на основе источника [2]

Расчет выполнялся в нестационарной постановке для захвата вихревой динамики. Временной шаг 0,005 с выбран на основе критерия Куранта ( $CFL < 1$ ). Общее время моделирования 50 с (10 000 шагов) обеспечило выход на статистически стационарный режим. Критерий сходимости: снижение невязок ниже  $10^{-5}$ . Баланс масс в установившемся режиме: расхождение между входным и выходным расходом не превышает 0,03 %.

#### Валидация CFD-модели

Для верификации результатов численного моделирования выполнено сравнение профиля тангенциальной скорости  $v_\theta(r)$  в горловине башни с аналитической моделью комбинированного вихря Ранкина, которая описывает двухзонную структуру закрученного потока: ядро твердотельного вращения и периферийную потенциальную область. Численная модель задана системой уравнений

$$v_\theta(r) = \begin{cases} \omega r, & 0 \leq r \leq r_c \\ \frac{\Gamma}{2\pi r}, & r > r_c \end{cases}, \quad (3)$$

где  $r_c$  – радиус ядра вихря (м),  $\omega$  – угловая скорость вращения ядра (рад/с),  $\Gamma$  – циркуляция скорости ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Параметры модели определяются аппроксимацией расчетных данных методом наименьших квадратов. Установлено, что радиус ядра составляет  $r_c \approx 0,05$  м, максимальная тангенциальная скорость в ядре достигает  $v_{\theta, \max} = 38,2$  м/с, а циркуляция  $\Gamma = 2\pi r_c v_{\theta, \max} \approx 12,0$   $\text{м}^2/\text{с}$ .

Сравнение CFD-профиля  $v_\theta(r)$  с моделью Ранкина показало, что среднеквадратичное отклонение в области  $r > r_c$  не превышает 8%, что подтверждает адекватность воспроизведения вихревой структуры. Дополнительная верификация выполнена путем сопоставления распределения статического давления на стенке гиперболической башни с экспериментальными данными Иванова и Мельникова [12], полученными для закрученных течений в сужающихся каналах. Относительная погрешность давления рассчитывалась как

$$\delta P = \frac{|P_{CFD} - P_{exp}|}{P_{exp}} \times 100\%$$

и составила не более 12% во всем диапазоне изменения осевой координаты. Такая точность является приемлемой для инженерных расчетов на стадии концептуально-проектирования.

#### Анализ кавитации

Для оценки возможности возникновения кавитации в проточном тракте ГЭБ выполнен анализ распределения абсолютного давления. Минимальное статическое давление в расчетной области зафиксировано в ядре вихря и составляет  $P_{изб, \min} = -191,83$  Па (относительное давление). Абсолютное давление определяется как

$$P_{абс, \min} = P_{атм} + P_{изб, \min},$$

где  $P_{атм} = 101325$  Па – нормальное атмосферное давление.

Подстановка дает

$$P_{изб, \min} = 101325 - 191,83 = 101133,17 \text{ Па.}$$

Давление насыщенных паров воды при температуре 20°C составляет  $P_{нас} \approx 2337$  Па.

Сравнение величин показывает, что

$$P_{абс, \min} \gg P_{нас}.$$

Следовательно, кавитационные явления в расчетном режиме отсутствуют. Запас по давлению до начала кавитации характеризуется коэффициентом

$$k_{кав} = P_{абс, \min} / P_{нас} \approx 43,3,$$

что позволяет пренебречь двухфазными эффектами при дальнейшем анализе.

#### Результаты CFD-моделирования и энергетический анализ

Моделирование выполнено для расхода воды  $Q = 18$   $\text{м}^3/\text{с}$  и глубины расположения верхнего среза башни  $h = 7,5$  м. На рис. 3 представлено поле скорости в осевом сечении тракта, подтверждающее формирование устойчивого закрученного потока.

Количественные результаты сведены в табл. 1. Ключевым является разделение локальных пиковых и среднемассовых значений.

Пиковая скорость 38,2 м/с наблюдается в крайне ограниченной зоне вихревого ядра и обусловлена трансформацией давления в кинетическую энергию в соответствии с уравнением Бернулли. Среднемассовая скорость (11,7 м/с) соответствует закону сохранения массы и определяет основной кинетический энергопотенциал. На рис. 4 показано поле относительного статического давления. В спиральном коллекторе наблюдается рост давления к периферии за счет центробежных сил (эффект, описываемый уравнением (2)). Минимальное давление в ядре вихря составило -191,83 Па (разрежение, эквивалентное 0,0196 м вод. ст.).

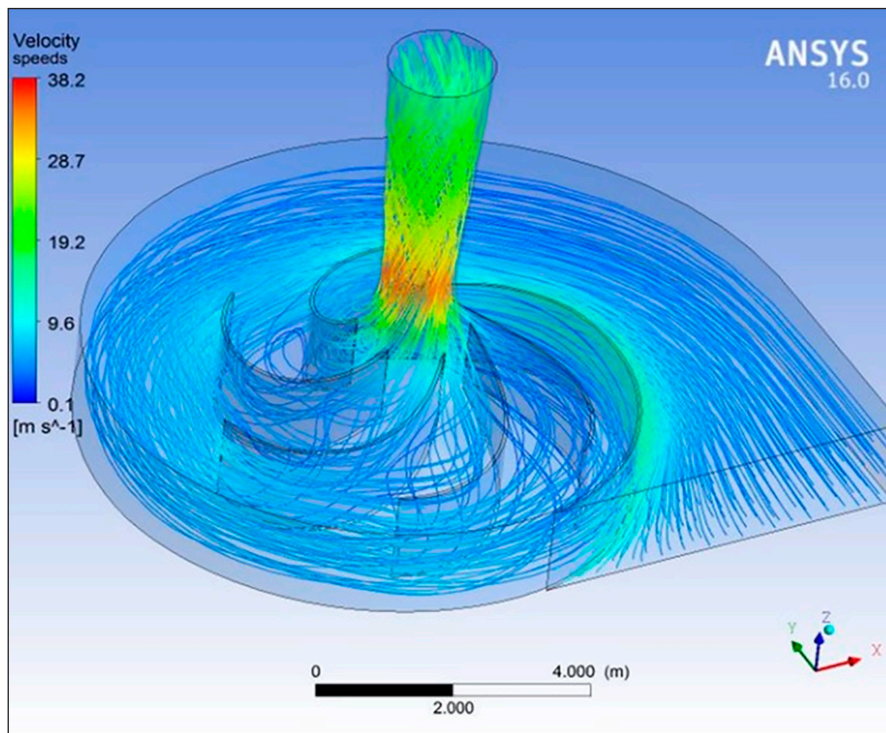


Рис. 3. Поле скорости в осевом сечении ГЭБ  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

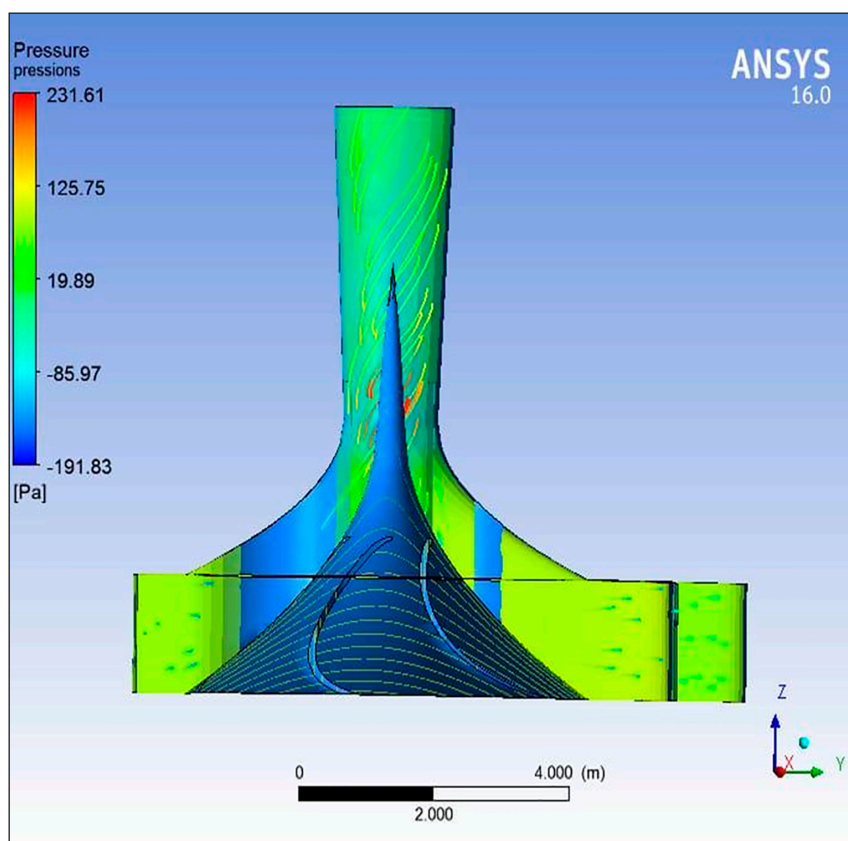


Рис. 4. Поле относительного статического давления  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

## Характерные значения скорости

Параметр	Значение	Примечание
Скорость на входе в коллектор	2,0 м/с	Граничное условие
Среднемассовая скорость в горловине ( $d = 1,4$ м)	11,7 м/с	Соответствует расходу 18 м <sup>3</sup> /с
Локальный максимум скорости в горловине	38,2 м/с	На оси вихря (диаметр ядра ~0,1 м)

Таблица 2

## Баланс полного удельного напора

Линия тока	Н на входе, м	Н в горловине, м	Н на выходе, м	Снижение Н, %
Осевая	7,50	7,42	5,81	22,5
Промежуточная	7,50	7,45	6,65	11,3
Периферийная	7,50	7,48	6,95	7,3
Среднемассовое	7,50	7,45	6,65	11,3

Для количественной проверки сохранения энергии проанализировано изменение полного удельного напора  $H$  (уравнение (1)) вдоль трех характерных линий тока: осевой (через ядро вихря), промежуточной и периферийной. Результаты представлены в табл. 2.

Снижение полного напора на 11,3% (0,85 м) вдоль средней линии тока характеризует интегральные гидравлические потери в установке. Разрежение в вихревом ядре (-0,0196 м) составляет менее 0,3 % от исходного напора, что подтверждает его незначительный вклад в общий энергобаланс.

*Расчет мощности на основе энергетического баланса*

ГЭБ относится к установкам кинетического типа, преобразующим скоростной напор потока в горловине. Для оценки располагаемой мощности используется теория идеального пропеллера (актуаторного диска). Согласно пределу Ланкастера – Бетца, максимальный коэффициент использования энергии потока  $C_\rho$  не может превышать

$$C_{\rho, \max} = \frac{16}{17} \approx 0,593.$$

Кинетическая мощность потока в выходном сечении башни (горловине) определяется выражением

$$P_{\text{потока}} = \frac{1}{2} \rho A v^3,$$

где  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воды,  $A = (\pi d^2) / 4$  – площадь поперечного сечения,  $v$  – среднемассовая скорость.

При диаметре выходного сечения  $d = 1,8$  м и скорости  $v = 11,7$  м/с (табл. 1) получаем

$$A = \frac{3,14 \cdot (1,8)^2}{4} = 2,54 \text{ м}^2,$$

$$P_{\text{теор, макс}} = C_{\rho, \max} \cdot P_{\text{потока}} = 0,593 \cdot 2,03 \approx 1,20 \text{ МВт}$$

Гидравлические потери в тракте, оцененные по снижению полного напора (табл. 2), равны 11,3%, что соответствует гидравлическому КПД

$$\eta_{\text{гидр}} = 1 - 0,113 = 0,887.$$

Механические потери в турбине и КПД генератора приняты равными  $\eta_{\text{мех+ген}} = 0,925$  (типичное значение для малых гидроагрегатов). Тогда ожидаемая электрическая мощность на выходе генератора

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{теор, макс}} \cdot \eta_{\text{гидр}} \cdot \eta_{\text{мех+ген}} = 1,20 \cdot 0,887 \cdot 0,925 \approx 0,985 \approx 1,0 \text{ МВт}$$

Полученное значение хорошо согласуется с первоначальной оценкой 1,056 МВт (по формуле для плотинных ГЭС) и базируется на физически корректной модели преобразования энергии для русловых установок. Небольшое расхождение объясняется округлением исходных данных и учетом ограничения Бетца, которое не было принято во внимание в первоначальном расчете.

Современные исследования гравитационных вихревых турбин [12, 13] показывают, что при оптимальном проектировании лопастных систем возможно достижение КПД на уровне 15–20 % для лаборатор-

ных прототипов и до 30–35 % для оптимизированных промышленных образцов. Представленная конструкция ГЭБ создает благоприятные гидравлические условия (устойчивый вихрь, высокие скорости в ядре) для последующей установки турбинного блока.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты построения поля скоростей в гиперболической башне показали, что вихревое ядро возникает в шейке, и здесь локальная скорость потока возрастает почти до 38,2 м/с при входящей скорости в спиральный коллектор 2 м/с. Однако эффективный напор для выработки мощности гидроэлектростанции определяется в основном гидростатическим давлением. То есть получаемая мощность в пределах 1 МВт соответствует оценкам для низконапорных установок при данном расходе и глубине. Это подтверждает физическую корректность CFD-модели и ее соответствие законам сохранения энергии. Для дальнейшего повышения эффективности и стабильности работы применяемых в ГЭБ гидротурбин можно применить управляющие вихревые структуры перед рабочим колесом, разработанные на основе фундаментальных численных исследований современных вихревых моделей [14–16].

Технология обладает рядом неоспоримых преимуществ, таких как дешевизна строительно-монтажных работ и высокая модульность конструкции, то есть наличие возможности установки турбогенератора полной заводской готовности в русле без масштабных гидротехнических сооружений. К преимуществам можно отнести также работу в различных условиях (подолдом, в придонных течениях). Основным ограничением является зависимость мощности от глубины установки (напора). Перспективными направлениями для повышения эффективности ГЭБ являются следующие основные направления:

1. Оптимизация геометрии спирального коллектора и профиля башни для минимизации потерь и стабилизации вихря.

2. Исследование возможности использования управляемого разрежения (вакуумных систем) для увеличения эффективного перепада давления, что требует отдельного анализа энергозатрат и риска кавитации.

3. Качественно иным направлением исследований является разработка импульсно-резонансных модификаций. В этом случае явление нестационарного волнового про-

цесса (гидравлического удара) предлагается использовать не в единичном, а в периодическом режиме, выводя гидравлическую систему в состояние управляемого акустического резонанса. Теоретически это может привести к кратному увеличению амплитуды колебаний давления и, соответственно, к росту мгновенной мощности, передаваемой на турбину.

### Заключение

На основе комплексного CFD-моделирования и теоретического анализа выполнена оценка эффективности новой технологии. Показано, что при расходе 18 м<sup>3</sup>/с и глубине 7,5 м установка способна вырабатывать мощность порядка 1 МВт. Основным источником энергии является гидростатический напор. Локальные вихревые эффекты, несмотря на значительное увеличение скорости в ядре потока, пока не вносят существенного вклада в общий энергобаланс, но способствуют стабилизации потока.

### Список литературы

1. Poff N. L., Schmidt J. C. How dams can go with the flow // *Science*. 2016. № 353 (6304). P. 1099–1100. DOI: 10.1126/science.aah4926.
2. Shang Y., Shang L., Li X. Technological Innovations and Advances in Hydropower Engineering. 2022. 116 p. DOI: 10.5772/intechopen.94652. ISBN 978-1-83968-915-4.
3. Basel I. Abed Ismail Introductory Chapter: Performance and Design Aspects of Hydro-Turbines for Green Hydroelectric Power Generation // *Advances in Hydropower Technologies*. 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1005681.
4. Deniz Ünsalan. Parametric analysis of gravity Vortex turbines as a low cost renewable energy alternative from low head hydraulic resources // *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2020. DOI: 10.21279/1454-864x-20-il-003.
5. Ахметов В. К. Влияние закрутки на устойчивость течений в каналах // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2021. № 3. С. 69–72. DOI: 10.37882/2223-2966.2021.03.02.
6. Поливанов П. А., Хотяновский Д. В., Кутепова А. И., Сидоренко А. А. Исследование различных подходов к моделированию ламинарно-турбулентного перехода в сжимаемых отрывных течениях // *Прикладная механика и техническая физика*. 2020. № 5. С. 40–51. DOI: 10.15372/PMTF20200505.
7. Роуч П. Дж. Вычислительная гидродинамика / Пер. с англ. В. А. Гулдина, В. Я. Митниченко; под ред. П. И. Чушкина. М.: Мир, 1980. 616 с.
8. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. Is. 8. P. 1598–1605.
9. Muhammad Mobeen, Saqib Jaweed, Ahmad Abdullah, Shummaila Rasheed, Manzar Masud Parametric Optimization of Gravitational Water Vortex Turbines for Enhanced Torque Generation // *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 45 (1). P. 3. DOI: 10.3390/engproc2023045003.
10. Chung T. J. Computational Fluid Dynamics. MONOGRAPH published 27 September 2010. DOI: 10.1017/cbo9780511780066.

11. Митрофанова О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-электрических установок. М.: Физматлит, 2010. 286 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68969> (дата обращения: 14.04.2026). ISBN 978-5-9221-1223-9.
12. Бардаков Р. Н., Чашечкин Ю. Д. Формирование регулярной последовательности вихревых петель вокруг вращающегося диска в стратифицированной жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2017. № 3. С. 3–11. DOI: 10.7868/S056852811703001X.
13. Dellinger N., François P., Lefebure D., Mose R., Garambois, P. A. An experiment of a hydropower conversion system based on vortex-induced vibrations in a confined channel // Renewable Energy 2018. Vol. 115. P. 54–63. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.122.
14. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск: ИТ, 2003. 504 с.
15. Алексеенко С. В., Дектерев А. А., Литвинов И. В., Минаков А. В., Пылёв И. М., Шандро А. И., Шторк С. И. Численное и экспериментальное моделирование течения в отсасывающей трубе гидротурбины // Журнал СВУ. Техника и технологии. 2011. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-i-eksperimentalnoe-modelirovanie-techeniya-v-otsasyvayuschey-trube-gidroturbiny> (дата обращения: 03.04.2026).
16. Скрипкин С. Г., Литвинов И. В., Шторк С. И. Экспериментальное исследование структуры закрученного течения в лабораторной модели отсасывающей трубы гидротурбины // Вестник ИрГТУ. 2013. № 3 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-struktury-zakruchennogo-techeniya-v-laboratornoy-modeli-otsasyvayuschey-truby-gidroturbiny> (дата обращения: 03.04.2026).

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.



## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Зеленин А. С., Астапов В. Н.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», Самара, Российская Федерация, e-mail: alex\_bum63@mail.ru*

В статье представлен аналитический обзор методов вулканизации резинотехнических изделий, играющей ключевую роль в формировании их эксплуатационных свойств, таких как эластичность, прочность, износостойкость. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества резинотехнических изделий, оптимизации производственных процессов, снижения энергозатрат и длительности цикла, соблюдения ужесточающихся экологических норм, а также адаптации технологий к новым эластомерным материалам. Цель работы – комплексно изучить методы вулканизации резинотехнических изделий, включая анализ производства резины, ее состава, структуры, требований к изделиям и оценку существующих технологий вулканизации, их особенностей, преимуществ, ограничений и сфер применения. Важными тенденциями развития производства являются автоматизация процессов, внедрение энергоэффективных технологий и бесконтактных методов контроля, а также использование цифровых моделей для прогнозирования свойств изделий. Эволюция методов вулканизации стремится к балансу между технологическими, экономическими и экологическими требованиями. Это особенно актуально в условиях растущей конкуренции на рынке резинотехнических изделий, где ключевыми факторами успеха становятся качество, энергоэффективность и экологическая безопасность производственных процессов. Данный обзор является актуальным и полезным для специалистов нефтяной отрасли, а также для всех, кто интересуется вопросами вулканизации резинотехнических изделий.

**Ключевые слова:** температура, вулканизация, данные, автоматизация, анализ, оптимизация, датчики

## ANALYTICAL REVIEW OF THE RESEARCH OF VULCANIZATION METHODS OF RUBBER PRODUCTS

Zelenin A., Astapov V.N.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Technical University", Samara, Russian Federation, e-mail: alex\_bum63@mail.ru*

The article presents an analytical review of vulcanization methods of rubber products, which play a key role in the formation of their operational properties, such as elasticity, strength, and wear resistance. The relevance of the research is determined by the need to improve the quality of rubber products, optimize production processes, reduce energy consumption and cycle time, comply with stricter environmental standards, as well as adapt technologies to new elastomeric materials. The purpose of the work is to comprehensively study the methods of vulcanization of rubber products, including an analysis of rubber production, its composition, structure, product requirements and an assessment of existing vulcanization technologies, their features, advantages, limitations and applications. Important trends in the development of production are automation of processes, the introduction of energy-efficient technologies and contactless control methods, as well as the use of digital models to predict the properties of products. The evolution of vulcanization methods strives for a balance between technological, economic and environmental requirements. This is especially important in the context of growing competition in the market of rubber products, where quality, energy efficiency and environmental safety of production processes are becoming key success factors. This review is relevant and useful for specialists in the oil industry, as well as for anyone interested in vulcanization of rubber products.

**Keywords:** Temperature, vulcanization, data, automation, analysis, optimization, sensors

### Введение

Резинотехнические изделия (РТИ) представляют собой важнейший класс конструкционных материалов, широко применяемых в машиностроении, авиационно-космической отрасли, нефтегазовом комплексе, медицине и других сферах промышленности. Их эксплуатационные характеристики – эластичность, прочность, износостойкость, герметичность, устойчивость к агрессивным средам и температурным воздействиям – формируются в ходе технологического

процесса вулканизации. Именно данный этап определяет конечные свойства изделий: от него зависят структура полимерной сетки, степень сшивки макромолекул и, как следствие, надёжность и долговечность готового продукта.

Актуальность обзора методов вулканизации обусловлена рядом факторов: повышением требований к качеству и стабильности эксплуатационных свойств РТИ; необходимостью оптимизации производственных циклов и сокращения энергозатрат; ужесто-

чением экологических норм и переходом на более безопасные вулканизирующие агенты; развитием новых эластомерных материалов (термоэластопластов, силиконовых и фторкаучуков), для каждого из которых требуется адаптация режимов вулканизации.

Несмотря на многолетнюю историю применения вулканизации, в отрасли сохраняется ряд нерешённых задач: неравномерность процесса, образование дефектов, высокая энергоёмкость, сложность контроля параметров в реальном времени. Это стимулирует поиск и внедрение инновационных методов, а также переоценку традиционных подходов с позиции современных технологических возможностей.

**Цель исследования** – провести аналитический обзор современных методов вулканизации РТИ и оценить их технологические преимущества, ограничения и области применения. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Проведение анализа предмета исследования – производства резины, её состава, структуры и ключевых требований к готовым изделиям.

2. Анализ существующих методов вулканизации, их технологических особенностей, преимуществ, ограничений и областей применения.

Проведённый аналитический обзор позволит сформировать целостное представление о современном состоянии и перспективах развития методов вулканизации РТИ, а также заложит основу для дальнейших исследований и внедрения инновационных решений в резинотехнической отрасли.

#### **Материалы и методы исследования**

Поиск литературы проводился в реферативных базах данных eLibrary.ru, КиберЛенинка (CyberLeninka), Google Scholar, а также в реестре действующих национальных стандартов (ГОСТ). Использовались следующие ключевые слова: «вулканизация», «серная вулканизация», «пероксидная вулканизация», «фенольная (смоляная) вулканизация», «радиационная вулканизация», «микроволновая вулканизация», «ТВЧ-вулканизация», «резинотехнические изделия».

Период поиска – 2015–2026 гг.; для изложения теоретических основ привлекались классические монографии более раннего периода. Критерии включения: рецензируемые научные публикации, монографии и учебники, действующие нормативные документы, посвящённые химии и технологии вулканизации, кинетике сшивания, аппаратному обеспечению процесса. Критерии исключения: маркетинговые обзоры рынка и рекламные материалы без технологиче-

ских данных, публикации без полнотекстового доступа, источники, не относящиеся к тематике вулканизации.

Всего отобрано и проанализировано 15 источников. Сравнение методов вулканизации выполнено по следующим критериям: температурный диапазон процесса, продолжительность вулканизации, тип каучука, рекомендуемая толщина изделия, формируемые эксплуатационные свойства, область применения и известные ограничения метода.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

##### *Анализ предмета исследования производства резины*

Производство резины представляет собой многостадийный процесс, в ходе которого из набора исходных компонентов формируется материал с заданными физико-механическими свойствами. Ключевую роль играет сырьевая база, включающая: каучуки (натуральные и синтетические), вулканизирующие агенты (сера, пероксиды, смолы), наполнители (технический углерод, кремнекислотные наполнители, каолин), пластификаторы (масла, сложные эфиры), антиоксиданты и антиозонанты, активаторы вулканизации (оксид цинка, стеариновая кислота) и другие функциональные добавки. Каждый компонент выполняет определённую функцию: каучук формирует эластичную основу, наполнители повышают прочность и износостойкость, пластификаторы улучшают технологичность, а стабилизаторы продлевают срок службы. Соотношение и качество сырья напрямую определяют конечные свойства резины – от твёрдости и эластичности до термостойкости и сопротивления старению [1].

Физико-химические основы вулканизации заключаются в образовании поперечных связей между макромолекулами каучука под действием вулканизирующих агентов и энергии внешнего воздействия (тепло, давление, излучение). В результате формируется трёхмерная сетчатая структура, обеспечивающая упругость, прочность и устойчивость к деформациям. Механизм процесса зависит от типа каучука и вулканизирующей системы: серная вулканизация создаёт полисульфидные связи, пероксидная – углерод-углеродные, а смоляная – эфирные. Кинетика реакции определяется температурой, концентрацией агентов и присутствием активаторов; при этом избыточное время или температура могут привести к реверсии (разрушению сетки). Ключевыми параметрами контроля являются степень сшивки,

плотность узлов сетки и распределение связей по длине [2, с. 9-14].

Технологические стадии производства РТИ включают: подготовку сырья (взвешивание, сушку, просеивание), смешение компонентов, формование заготовок, вулканизацию и финишную обработку. Каждый этап требует строгого соблюдения режимов: отклонение температуры или времени смешения ведёт к неоднородности смеси, а нарушение параметров прессования – к дефектам формы. Важнейшим условием является непрерывность контроля на всех переходах, поскольку ошибки на ранних стадиях невозможно компенсировать на последующих [3].

*Аналитическая оценка технологических стадий производства*

Проведённый анализ технологического процесса показывает, что наибольшее влияние на качество готовых изделий оказывают стадии смешения и вулканизации. Нарушение температурного режима при смешении приводит к локальному перегреву смеси и частичной подвулканизации, что снижает эластичность изделий и вызывает неравномерность структуры. Вулканизация, в свою очередь, определяет степень сшивки полимерной матрицы, от которой зависят прочность, стойкость к старению и сопротивление деформациям.

Сравнение технологических стадий представлено в таблице 1.

Из представленных данных следует, что наиболее критичными параметрами являются температура и продолжительность вулканизации, так как именно они определяют формирование пространственной сетки каучука. При недостаточной степени сшивки изделия обладают низкой механической прочностью, а при чрезмерной – становятся хрупкими и склонными к разрушению.

Смешение резиновой смеси – критическая операция, от которой зависит равномерность распределения компонентов и, следовательно, однородность свойств готового изделия. Процесс осуществляется в резиносмесителях периодического или непрерывного действия при контролируемых температуре и скорости вращения роторов. Основные задачи: диспергирование наполнителей, растворение пластификаторов, равномерное распределение вулканизирующих агентов. Оптимальные параметры подбираются исходя из вязкости каучука и рецептуры: для жёстких смесей требуется более интенсивное механическое воздействие, для мягких – щадящий режим во избежание преждевременной подвулканизации [1, с. 3-5].

Калибровка и формование заготовок обеспечивают получение полуфабрикатов заданной геометрии перед вулканизацией. Методы варьируются в зависимости от типа изделия: каландрование (для листов и плёнок), экструзия (для профилей и труб), шприцевание (для заготовок шин), прессование в формах (для уплотнителей и манжет). На данном этапе критически важны: точность размеров, отсутствие воздушных включений и равномерность толщины.

Аппаратурное обеспечение играет определяющую роль в достижении стабильного качества РТИ, поскольку технологическое оборудование обеспечивает реализацию всех ключевых стадий производства с требуемой точностью и воспроизводимостью. К основным группам оборудования относятся резиносмесители, каландры, экструдеры и вулканизационные прессы. Современные линии оснащаются автоматизированными системами управления, позволяющими отслеживать критические точки процесса и корректировать режимы в реальном времени [4, с. 22-23].

**Таблица 1**

Влияние технологических стадий на качество РТИ

Технологическая стадия	Основные параметры контроля	Возможные дефекты	Влияние на свойства изделия
Подготовка сырья	Влажность, дисперсность	Неоднородность смеси	Снижение прочности
смешение	Температура, время, скорость роторов	Подвулканизация, агломерация наполнителя	Потеря эластичности
Формование	Давление, точность геометрии	Пузыри, разнотолщинность	Нарушение размеров
Вулканизация	Температура, давление, время	Перевулканизация, недосшивка	Снижение износостойкости
Финишная обработка	Качество поверхности	Трещины, заусенцы	Ухудшение внешнего вида

Примечание: составлено авторами по результатам исследования.

Анализ современных производственных линий показывает, что автоматизация процессов позволяет повысить воспроизводимость свойств продукции и снизить долю технологического брака за счёт более точного контроля температурных режимов; конкретные количественные оценки эффекта в литературе варьируются в зависимости от типа линии и не приводятся в данной работе ввиду отсутствия единой методики измерения.

Важными тенденциями являются: переход на энергоэффективные нагреватели, внедрение бесконтактных методов контроля (ИК-термография, ультразвуковая дефектоскопия) и использование цифровых моделей для прогнозирования свойств изделий [5]. От надёжности и точности оборудования зависят: равномерность прогрева, стабильность геометрии, отсутствие перевулканизации и механическая прочность готовых изделий.

#### *Анализ методов вулканизации резиновых изделий*

Вулканизация представляет собой ключевой технологический процесс в производстве РТИ, в ходе которого происходит формирование пространственной сетчатой структуры эластомера за счёт образования поперечных связей между макромолекулами каучука. Этот процесс определяет основные эксплуатационные характеристики изделий: прочность, эластичность, износостойкость, термостойкость и устойчивость к деформациям. Выбор метода вулканизации зависит от типа каучука, рецептуры резиновой смеси, геометрии изделия, требований к свойствам и экономических факторов.

Серная вулканизация остаётся наиболее распространённым промышленным методом. В качестве сшивающего агента используется сера (1-3% от массы каучука) в сочетании с активаторами (оксид цинка, стеариновая кислота) и ускорителями. Образуются преимущественно полисульфидные и моносульфидные поперечные связи; типичный температурный диапазон – 140-160 градусов Цельсия, продолжительность – от нескольких минут до десятков минут в зависимости от рецептуры и толщины изделия [1, с. 3-5; 6].

Пероксидная вулканизация основана на радикальном сшивании макромолекул органическими пероксидами с образованием прочных углерод-углеродных связей. Метод обеспечивает повышенную термостойкость и устойчивость к старению; применяется преимущественно для насыщенных каучу-

ков (ЭПДМ, силиконовых, фторкаучуков), для которых серная система малоэффективна. Типичные температуры процесса – 160-180 градусов Цельсия [1, с. 3-5; 7].

Смоляная (фенольная) вулканизация основана на сшивании каучуков фенолформальдегидными смолами с образованием эфирных и метиленовых мостиков. Метод применяется главным образом для бутилкаучука и ЭПДМ; типичная температура процесса – 180-200 градусов Цельсия. Обеспечивает повышенную стойкость к агрессивным средам и тепловому старению [1, с. 2-4].

К физико-энергетическим методам вулканизации относятся радиационная, микроволновая и ТВЧ-вулканизация. Радиационная вулканизация основана на образовании макрорадикалов под действием ионизирующего излучения и обеспечивает точный контроль степени сшивки без вулканизирующих агентов. Микроволновое и ТВЧ-нагревание обеспечивают объёмный нагрев заготовки, что особенно эффективно для непрерывных линий и тонкостенных профилей [7; 8].

#### *Сравнительный анализ методов вулканизации*

Сводное сопоставление основных методов вулканизации по технологическим параметрам и сферам применения приведено в таблице 2. Сравнение выполнено по данным литературных источников; экспериментальная проверка в рамках настоящего обзора не проводилась.

Из данных, обобщённых в таблице 2, следует, что серная вулканизация сохраняет лидирующие позиции благодаря экономической доступности и универсальности применения. Для изделий, эксплуатируемых при повышенных температурах, более предпочтительной является пероксидная вулканизация, обеспечивающая высокую термостойкость и устойчивость к старению. Фенольная вулканизация применяется в нишевых задачах, требующих стойкости к агрессивным средам.

Особое место занимает вулканизация шин, отличающаяся повышенной сложностью из-за крупных габаритов изделий, многослойной структуры и необходимости равномерного прогрева. Основным методом является пресовая вулканизация в индивидуальных форматерах-вулканизаторах (ИФВ). Для крупногабаритных шин применяется автоклавная вулканизация, обеспечивающая более равномерный прогрев, но увеличивающая продолжительность цикла [9, с. 33–38].

Таблица 2

Сравнительная характеристика методов вулканизации (по литературным данным)

Метод вулканизации	Температура, °С	Продолжительность, мин.	Тип каучука	Толщина изделия	Свойства после вулканизации	Область применения	Источники
Серная	140–160	10–60	НК, СКИ, БСК, БНК	до десятков мм	Полисульфидные связи; высокая эластичность; умеренная теплостойкость (до ~100 °С)	Шины, массовые РТИ	[1; 6]
Пероксидная	160–180	5–30	ЭПДМ, силиконовые, фторкаучуки	малая и средняя	С–С связи; термостойкость до ~200 °С; устойчивость к старению	Тепло- и атмосферостойкие изделия	[1; 7]
Фенольная (смоляная)	180–200	10–60	Бутилкаучук, ЭПДМ	средняя	Эфирные/метиленовые мостики; хемостойкость; стойкость к перегретому пару	Изделия для агрессивных сред	[1]
Микроволновая	объёмный нагрев	сокращённый цикл	НК, СКИ, силиконовые	тонкостенные	Равномерная степень сшивки по объёму	Непрерывные профилли, шланги	[7; 8]
Радиационная	температура близка к комнатной	минуты	ПЭ, ЭПДМ, силиконовые	тонкие плёнки и оболочки	Контролируемая степень сшивки без агентов	Кабельная изоляция, спец. изделия	[8]
ТВЧ	объёмный нагрев	сокращённый цикл	НК, СКИ, БНК	средние и толстостенные	Равномерный прогрев по сечению	Толстостенные профилли и плиты	[5; 8]

Примечание: составлено авторами по [1; 5-8].

*Анализ современных тенденций  
развития вулканизации*

По данным литературных источников, основными направлениями совершенствования процессов вулканизации являются повышение энергоэффективности, сокращение времени технологического цикла и снижение экологической нагрузки [5; 7; 8].

Микроволновая вулканизация за счёт объёмного нагрева позволяет существенно сократить продолжительность процесса по сравнению с традиционной серной вулканизацией; конкретные значения сокращения цикла, приводимые в литературе, зависят от рецептуры и геометрии изделия и не верифицировались в рамках настоящего обзора. Радиационная вулканизация обеспечивает высокую точность контроля степени сшивки, однако ограничивается высокой стоимостью оборудования и повышенными требованиями безопасности [7; 8].

Перспективным направлением развития процессов вулканизации считается внедрение цифровых систем управления, использующих датчики температуры, давления и крутящего момента, а также алгоритмы машинного обучения для прогнозирования свойств готовых изделий [10]. Такие системы обеспечивают непрерывный контроль технологических параметров в реальном времени и позволяют автоматически корректировать режимы вулканизации.

Выбор метода вулканизации определяется совокупностью технологических, эксплуатационных и экономических факторов. Ключевыми критериями являются тип каучука и рецептура смеси, геометрия изделия, требования к прочности и эластичности, условия эксплуатации, стоимость оборудования и экологические ограничения [11; 12]. Для тонкостенных изделий более рационально применение ТВЧ- и микроволновой вулканизации, тогда как для крупногабаритных изделий сохраняют актуальность автоклавные и прессовые методы.

Основными проблемами современных методов вулканизации остаются неравномерность прогрева толстостенных изделий, риск перевулканизации поверхностных слоёв, высокая энергоёмкость процессов и выбросы летучих соединений при серной вулканизации [13, с. 276-278]. Сопоставление различных технологий показывает, что традиционные методы уступают современным электрофизическим способам по скорости процесса, однако сохраняют преимущества в универсальности и стабильности получения изделий сложной формы.

В литературе обсуждаются «зелёные» вулканизирующие системы (со снижением

содержания серы и применением биоразлагаемых компонентов), которые рассматриваются как способ уменьшения экологической нагрузки; количественная оценка экологического эффекта зависит от методики сравнения и в данной работе не приводится [14]. Одновременно развивается автоматизация процессов с применением методов машинного обучения для прогнозирования свойств готовых изделий и снижения доли производственных дефектов. Ведётся также разработка специализированных режимов вулканизации для новых типов эластомерных материалов, включая термоэластопласты и биополимеры [15].

Таким образом, обзор современных публикаций позволяет предположить, что развитие методов вулканизации ориентировано на повышение качества продукции, снижение энергозатрат и экологической нагрузки производства. Наиболее перспективными направлениями представляются гибридные технологии, цифровизация управления процессом и внедрение экологически безопасных вулканизирующих систем.

*Ограничения обзора*

Настоящая работа имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации её результатов:

- работа представляет собой литературный обзор и не включает экспериментальной проверки рассмотренных методов вулканизации;
- сравнение методов вулканизации выполнено по литературным данным; единая методика сопоставления режимов и эксплуатационных характеристик в рассмотренных источниках отсутствует;
- количественная метаоценка энергоэффективности методов вулканизации и снижения доли брака не проводилась в связи с разнородностью первичных данных;
- приводимые сведения о температурных режимах и продолжительности процессов следует рассматривать как ориентировочные диапазоны; конкретные значения для промышленного применения должны уточняться по технологическим регламентам;
- обзор ограничен русскоязычной и доступной англоязычной литературой за период с 2015 по 2026 г.; работы на других языках и публикации с ограниченным доступом не рассматривались.

**Заключение**

В результате проведённого аналитического обзора методов РТИ удалось системно рассмотреть ключевые аспекты производства и технологического совершенствования данного процесса. Анализ предмета

исследования производства резины показал, что качество РТИ формируется на всех этапах производственного цикла – начиная с подбора сырьевой базы и заканчивая финишной обработкой изделий. Установлено, что определяющую роль играют: состав резиновой смеси (тип каучука, вулканизирующие агенты, наполнители, пластификаторы), физико-химические закономерности процесса вулканизации (формирование сетчатой структуры, кинетика реакции, влияние активаторов), точность соблюдения технологических режимов (смешение, формирование, вулканизация) и уровень аппаратного обеспечения.

Сравнительный анализ методов вулканизации показал, что классические методы (серная, пероксидная, смоляная) сохраняют значимость в промышленности, однако имеют ограничения по энергоёмкости, экологичности и адаптивности к новым материалам. Для крупногабаритных изделий, прежде всего шин, критически важны равномерность прогрева и точный контроль параметров, что обеспечивается прессовой и автоклавной вулканизацией. Среди перспективных направлений отмечены микроволновая, радиационная и ТВЧ-вулканизация, позволяющие, по литературным данным, сократить продолжительность цикла и улучшить равномерность сшивки.

Обобщая полученные результаты, можно предположить, что развитие методов вулканизации идёт по нескольким ключевым направлениям: внедрение гибридных технологий, экологизация производства, автоматизация и интеллектуализация процессов, адаптация к новым эластомерным материалам. Проведённый обзор позволяет предположить, что дальнейшее совершенствование методов вулканизации останется важным фактором конкурентоспособности резинотехнической промышленности; для получения количественно обоснованных выводов о сравнительной эффективности методов требуются дополнительные экспериментальные исследования и систематические метаанализы, выходящие за рамки настоящей работы.

#### Список литературы

1. Золотарев В. Л., Левенберг И. П., Зуев А. А., Ковалева Л. А., Люсова Л. Р., Липатова А. А. Ещё раз о 1,4-циполизопренах // Производство и использование эластомеров. 2021. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/escheraz-o-1-4-tsis-poliizoprenah> (дата обращения: 22.02.2026).

2. Осовская И. И., Савина Е. В., Левич В. Е. Эластомеры: учебное пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУТД, 2016. 126 с. ISBN 978-5-91646-085-8.

3. ГОСТ Р 58910.1-2020. Каучук и резина. Материалы промышленные контрольные. Ч. 1. Общие требования. Введ. 2021-01-01. М.: Стандартинформ, 2020. 24 с.

4. Назаров Э. С., Турсунов А. Н. Перспективные достижения в области технологии композиционных материалов // Вестник науки и образования. 2021. № 8-3 (111). С. 21–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnyye-dostizheniya-v-oblasti-tehnologii-kompozitsionnyh-materialov> (дата обращения: 24.02.2026).

5. Люсова Л. Р., Чернышов С. В. Применение технологий цифровой трансформации в процессе разработки эластомерных материалов // Производство и использование эластомеров. 2022. №3-4. С. 33-38. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologii-tsifrovoy-transformatsii-v-protsesse-razrabotki-elastomernyh-materialov> (дата обращения: 29.02.2026).

6. Чайкун А. М., Алифанов Е. В., Наумов И. С. Эластомерные материалы для применения в топливных и масляных системах (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 3–4 (30). С. 50–60.

7. Вольфсон С. И., Хусаинов А. Д., Панфилова О. А., Касперович А. В., Шашок Ж. С., Усс Е. П. Технология и переработка эластомеров: пневматические шины: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2024. 144 с. ISBN 978-5-507-52393-1. URL: <https://e.lanbook.com/book/482834> (дата обращения: 29.02.2026).

8. Амелина Н. В., Беляев П. С., Клинок А. С., Соколов М. В. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса изготовления резиновых нитей из латекса: монография. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 80 с. ISBN 978-5-8265-1405-4.

9. ГОСТ 18829-2017. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Технические условия. Дата введения 2018-07-01. М.: Стандартинформ, 2017.

10. Васильев В. А., Александрова С. В. Цифровые технологии в управлении качеством // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-tehnologii-v-upravlenii-kachestvom> (дата обращения: 11.05.2026).

11. Пушница А. С., Власов В. В., Москалев А. С. Перспективы разработки топливостойких эластомерных материалов для применения в регионах с холодным климатом // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2025. Т. 87, № 1. С. 227–234. DOI: 10.20914/2310-1202-2025-1-227-234 (дата обращения: 22.02.2026).

12. Чайкун А. М., Наумов И. С., Алифанов Е. В. Резиновые уплотнительные материалы (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 1 (49). С. 99–106. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-01-12-12. (дата обращения: 02.01.2026).

13. Ярцева Т. А., Карманова О. В., Михалева Н. А., Ткачев А. В. Использование модифицированного «неодимового» полибутадиена в рецептуре обкладки конвейерных лент // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84, № 2. С. 276–281. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-276-281. (дата обращения: 08.01.2026).

14. Спиридонов И. С., Ушмарин Н. Ф., Егоров Е. Н., Сандалов С. И., Кольцов Н. И. Влияние графена на свойства термоагрессивостойкой резины // Промышленное производство и использование эластомеров. 2021. № 1. С. 29–33.

15. Тихомиров С. Г., Карманова О. В., Битюков В. К., Маслов А. А. Программное обеспечение задачи определения оптимального времени вулканизации резиновых смесей // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 4. С. 108–116. DOI: 10.17308/sait.2018.4/1260.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.



## КОНЦЕПЦИЯ ИНСТРУМЕНТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА С АВТОРАМИ СТАТЕЙ

Смолянов А. Г. ORCID ID 0009-0005-6928-0711,

Бурлакова Т. С. ORCID ID 0009-0001-7293-4879

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва», Саранск, Российская Федерация, e-mail: tania.bourlakova2002@yandex.ru*

Устаревшие методы коммуникации в некоторых научных журналах вызывают задержки, непрозрачность процессов и снижение удовлетворенности авторов. Цель исследования – разработка концепции универсального инструмента взаимодействия между редакцией и авторами на основе современных веб-технологий, которая может быть адаптирована для широкого круга научных изданий. Проведен анализ литературы и существующих систем управления научными журналами. В статье сформулированы функциональные требования и смоделированы пользовательские сценарии для основных участников редакционного процесса. Использована клиент-серверная архитектура как основа проектирования структуры инструмента взаимодействия. Разработана концепция инструмента с централизованной архитектурой, обеспечивающей четкое разделение ролей и сквозное отслеживание статусов. Реализованы прототипы интерфейсов для авторов, редакторов и рецензентов. Особое внимание уделено открытости: автор получает полный текст рецензии в стандартных форматах, что повышает доверие и снижает число уточняющих запросов. Предложенная концепция решает ключевые проблемы редакционного процесса и может быть реализована в виде масштабируемого, адаптируемого программного решения, что позволит сократить временные затраты на администрирование и повысить эффективность работы научных журналов. Результаты работы закладывают основу для создания гибкой системы, пригодной для развертывания в редакциях малых и средних изданий.

**Ключевые слова:** научные публикации, статьи, автор, редакция, веб-архитектура, клиент/сервер, редакционные процессы, автоматизация

## THE CONCEPT OF A TOOL FOR INTERACTION BETWEEN THE EDITORIAL STAFF OF A SCIENTIFIC JOURNAL AND THE AUTHORS OF ARTICLES

Smolyanov A. G. ORCID ID 0009-0005-6928-0711,

Burlakova T. S. ORCID ID 0009-0001-7293-4879

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research Mordovia State University named after N. P. Ogarev”, Saransk, Russian Federation, e-mail: tania.bourlakova2002@yandex.ru*

Outdated methods of communication in some scientific journals cause delays, lack of transparency in processes, and decrease in satisfaction of authors. The purpose of the research is to develop the concept of a universal tool for interaction between editors and authors based on modern web technologies, which can be adapted for a wide range of scientific publications. The analysis of the literature and existing management systems of scientific journals is carried out. The article formulates functional requirements and models user scenarios for the main participants in the editorial process. The client-server architecture is used as the basis for designing the structure of the interaction tool. The concept of a tool with a centralized architecture has been developed, providing a clear separation of roles and end-to-end status tracking. Prototypes of interfaces for authors, editors, and reviewers have been implemented. Special attention is paid to openness: the author receives the full text of the review in standard formats, which increases trust and reduces the number of clarifying requests. The proposed concept solves the key problems of the editorial process and can be implemented as a scalable, adaptable software solution, which will reduce the time spent on administration and increase the efficiency of scientific journals. The results of the work lay the foundation for creating a flexible system suitable for deployment in the editorial offices of small and medium-sized publications.

**Keywords:** scientific publications, articles, author, editorial staff, web architecture client/server, editorial processes, automation

### Введение

Стремительное развитие коммуникационных технологий и рост объема научных публикаций требуют новых подходов для конструктивной организации редакционных процедур в научных изданиях. Однако некоторые научные журналы продолжают придерживаться устаревших подходов

в коммуникации, что порождает ряд трудностей для всех сторон взаимодействия.

Ручные процессы вычитки и корректуры текстов, а также отсутствие системы автоматизированного отслеживания статусов увеличивают сроки на рецензирование и последующую публикацию и усложняют контроль над этапами рассмотрения статьи.

Работа с документами посредством электронной почты или иных методов обмена информацией создает организационные сложности, вызывая задержки в согласовании правок и несвоевременную обратную связь.

Эти проблемы могут негативно сказаться на репутации журнала и снизить интерес авторов к публикации своих работ. В то время как современные технологии, в частности веб-архитектура «Клиент/Сервер», предоставляют новые возможности для автоматизации и оптимизации этого процесса.

**Цель исследования** – разработка концепции универсального инструмента взаимодействия между редакцией и авторами, основанной на современных веб-технологиях, которая могла бы быть адаптирована для широкого круга научных изданий.

#### **Материалы и методы исследования**

Текущее исследование проводилось в три последовательных этапа. На первом этапе был выполнен анализ научной литературы. Поиск источников осуществлялся в открытых электронных библиотеках и поисковых системах сети Интернет, в том числе eLibrary и CyberLeninka. При этом использовались следующие ключевые слова на русском и английском языках: редакционный процесс, коммуникация редакции и авторов, управление научным журналом, автоматизация научных журналов, рецензирование, веб-архитектура клиент-сервер, Open Journal Systems, ScholarOne, Editorial Manager, editorial workflow automation, scientific journal management system, manuscript management systems. Период поиска охватывал 2011–2025 гг. с акцентом на публикации последнего десятилетия.

Критериями включения выступали: наличие эмпирических или аналитических данных по проблемам взаимодействия в редакциях, описание функциональных возможностей существующих систем управления журналами либо архитектурные решения веб-приложений для научных изданий.

Критериями исключения являлись: публикации до 2011 г. (за исключением работ, признанных фундаментальными в данной области), а также исследования, фокусирующиеся исключительно на традиционном издательском деле без анализа цифровых коммуникационных инструментов. Первоначально было найдено около 40 источников, после удаления дубликатов и фильтрации по релевантности для детального анализа отобрано 17 работ, вошедших в итоговый обзор, включая рецензируемые статьи, материалы конференций, техническую документацию и отраслевые обзоры.

Анализ отобранных источников позволил выявить, что проблемы взаимодействия между авторами и редакциями научных журналов рассматривались в ряде исследований.

Так, И. Д. Котляров отмечает следующие организационные барьеры: избыточные бюрократические требования к подаче рукописей и несвоевременное информирование автора о движении статьи, что создает непрозрачность процесса для исследователя [1].

Е. В. Иваницкая отмечает, что цифровизация научной коммуникации и развитие технологий обработки больших данных создают предпосылки для формирования новых инструментов оценки научной деятельности. Автор подчеркивает потребность в единой аналитической платформе, объединяющей данные о публикациях, и выступает за переход к «качественной наукометрии» [2].

О. Н. Хрусталева на примере ведомственных журналов демонстрирует, что проблемы взаимодействия авторов и редакций носят системный характер. Автор подчеркивает необходимость совершенствования коммуникации между авторами и редакциями посредством создания и поддержки собственных сайтов [3].

В то же время Д. Ю. Ахметов и М. С. Галлявиева в своих работах [4–6] предложили подходы к организации архитектуры информационных систем на базе платформы Open Journal Systems (OJS) для автоматизации редакционно-издательских процессов.

Но, несмотря на детальную проработку проблематики, в существующих исследованиях отсутствует концепция универсального инструмента коммуникации, что определяет научную новизну данной работы.

Кроме того, в рамках первого этапа также был проведен анализ функциональных возможностей существующих систем управления журналами: Open Journal Systems [7], ScholarOne [8], Editorial Manager [9, 10]. Они обеспечивают автоматизацию процесса подачи и рецензирования статей, предоставляя при этом функционал для более легкой коммуникации между авторами и издательствами.

Поскольку разработчики коммерческих систем ScholarOne и Editorial Manager не публикуют открытые тарифы, оценка их доступности проводилась на основе сравнительных исследований. Они показывают, что данные решения используют модели корпоративного лицензирования с индивидуальным ценообразованием, что может создавать финансовые барьеры для малых научных журналов с ограниченным бюд-

жетом [9, 10]. В отличие от них, решение с открытым исходным кодом Open Journal Systems предоставляет базовый функционал без лицензионных отчислений [7], однако его внедрение и поддержка требуют собственных технических ресурсов или затрат на сторонний хостинг, что также необходимо учитывать при выборе данной платформы.

Дополнительно были изучены возможности веб-архитектуры «Клиент/Сервер», а также подходы и принципы проектирования современных веб-приложений с ее использованием. На основе анализа литературы были выявлены следующие сильные и слабые стороны данной архитектуры.

Ключевыми преимуществами клиент-серверной архитектуры являются: четкое разделение функций между сервером и клиентом, снижение требований к пользовательским устройствам, централизованное хранение и защита данных, а также возможность масштабирования системы при росте нагрузки [11, 12].

Слабые же стороны включают: зависимость от стабильности серверного оборудования, риск отказа всей системы при сбое сервера, а также потенциальные уязвимости при некорректной настройке прав доступа и маршрутизации запросов [11, 13]. Практический опыт создания веб-приложений подтверждает эффективность трехуровневой модели («клиент – сервер – база данных») для построения надежных и гибких информационных систем [14].

На втором этапе методом обобщения и синтеза были сформулированы функциональные требования к проектируемому инструменту с учетом ролей участников публикационного процесса (автор, редактор-менеджер, рецензент, редактор). Требования включали: возможность регистрации и управления профилем, подачи статьи с метаданными, отслеживания статусов по каждому этапу, получения рецензий и принятия редакционных решений в единой среде.

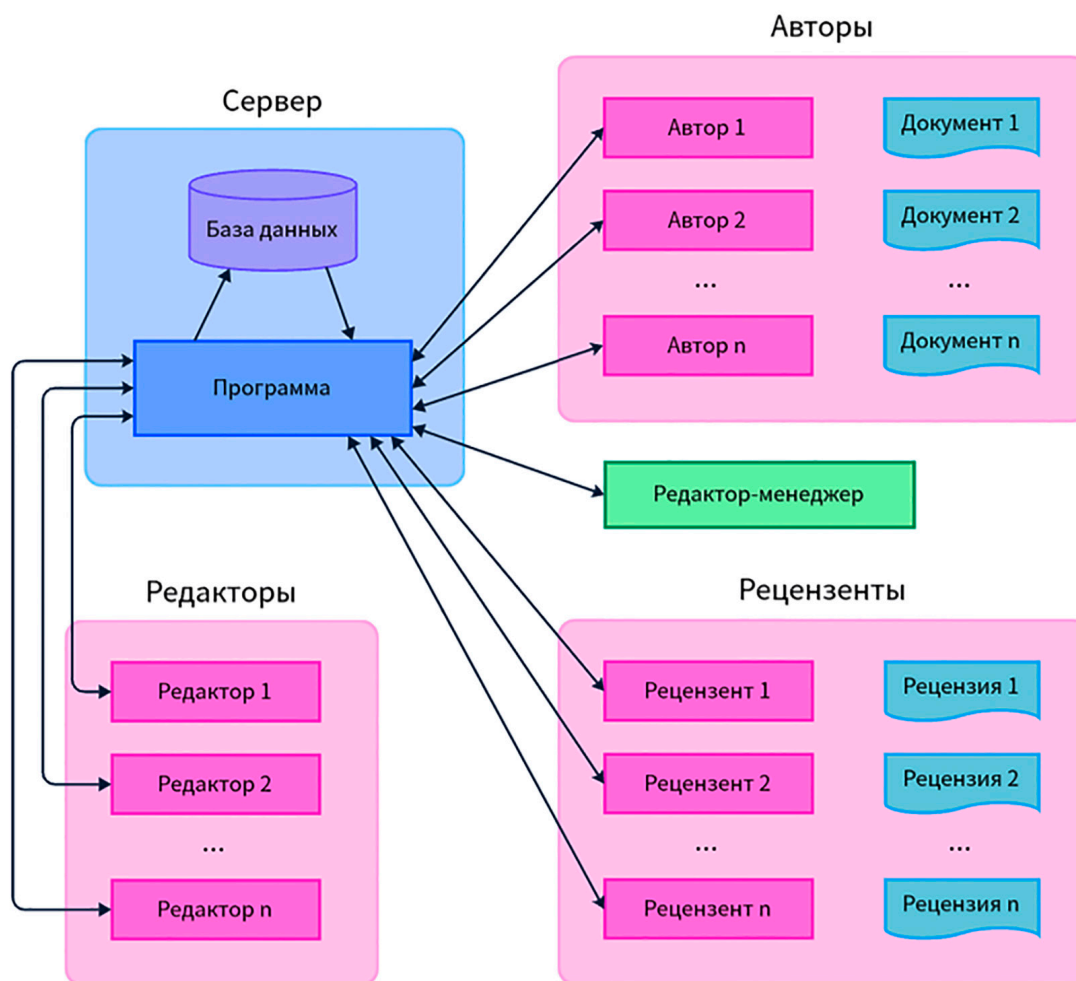


Рис. 1. Структура инструмента взаимодействия  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

На третьем этапе была применена методология проектирования на основе моделирования пользовательских сценариев. Для каждой роли разработаны типовые сценарии взаимодействия с системой (например: автор подает статью → редактор-менеджер назначает рецензента → рецензент загружает отзыв → редактор принимает решение). На основе этих сценариев спроектирована структура инструмента (рис. 1) с использованием веб-архитектуры «Клиент/Сервер».

Одним из компонентов данной структуры является удаленный сервер, на котором хранится база данных, содержащая основные сведения об авторах и работниках издательства, а также о самих статьях. Кроме того, на сервере хранится программа описываемого инструмента. Рассматриваемая структура также содержит ключевых действующих лиц: авторов статей, редакторов и рецензентов, между которыми устанавливается взаимодействие посредством программы, которой пользуется каждый из них.

Использованные в предлагаемой системе технологии были успешно применены ранее при создании компьютерной системы «SQL-Start» на кафедре фундаментальной информатики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» в 2022–2025 гг. [15, 16]. Будучи построенной на основе классической веб-технологии «Клиент/Сервер» и развернутой на удаленном сервере, система пока-

зала высокую надежность и устойчивость в условиях реальной работы с применением различных устройств: смартфона, планшета, ноутбука, стационарного компьютера. Предлагаемая авторами система является хорошим примером цифровизации конкретного вида профессиональной деятельности [17].

Таким образом, выбор клиент-серверной архитектуры для инструмента взаимодействия редакции с авторами статей обусловлен ее масштабируемостью, кроссплатформенностью и возможностью обеспечить безопасный и синхронизированный обмен данными между всеми участниками процесса.

### Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с описанной методологией была разработана концепция универсального инструмента взаимодействия для научных журналов.

Основным результатом проектирования стала структура данного инструмента, представленная на рис. 1. Она обеспечивает централизованное управление редакционным процессом и, в отличие от фрагментированного взаимодействия по электронной почте, гарантирует синхронизацию данных для всех участников. Кроме того, данная модель реализует четкое разделение функциональных ролей.

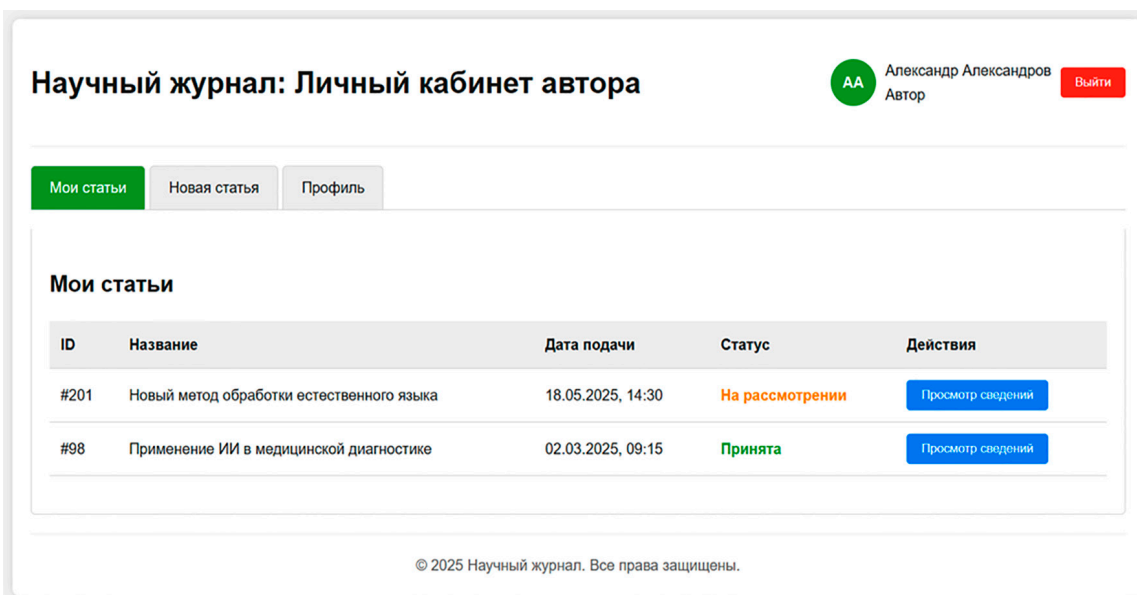


Рис. 2. Панель просмотра автором своих статей  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Автор получает единую точку для подачи статьи, отслеживания ее статуса в режиме реального времени и получения структурированной и детализированной обратной связи. Редактор-менеджер управляет потоком статей, занимается вычиткой рукописей, назначает рецензентов и редакторов, а также контролирует соблюдение сроков, имея полную картину по всем материалам. Рецензент получает стандартизированные задания на рецензирование с четкими сроками и отправляет заключения с сопутствующими комментариями как редакторам, так и самим авторам. Редактор принимает финальное решение на основе всей совокупности данных по статье (текст, метаданные, рецензии).

Кроме того, центральным результатом, направленным на преодоление ключевой

проблемы – отсутствия информированности авторов, стала реализация механизма сквозного отслеживания статусов. Каждому этапу жизненного цикла статьи присваивается временная метка и комментарий. Это позволяет автору в режиме реального времени наблюдать прогресс обработки своей рукописи, что кардинально снижает количество запросов в адрес редакции и обеспечивает легкость коммуникации.

Верификация разработанной концепции выполнена через создание прототипов ключевых пользовательских интерфейсов. Прототипы наглядно демонстрируют реализацию заявленных функций.

На рис. 2, 3 представлен прототип личного кабинета автора с панелью отслеживания статусов всех рукописей, поданных на рассмотрение.

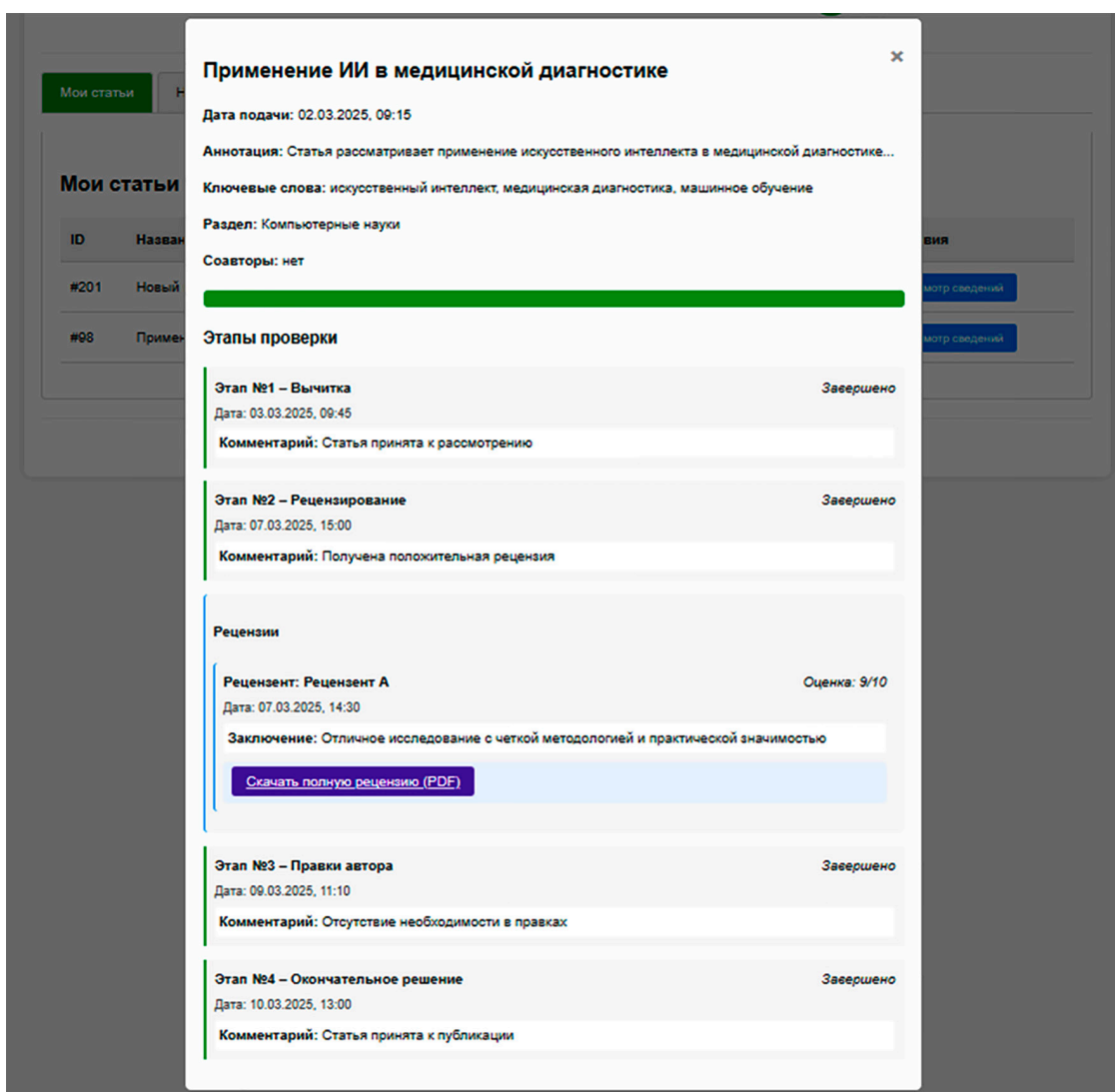


Рис. 3. Модальное окно для детального отслеживания всех этапов по статье  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

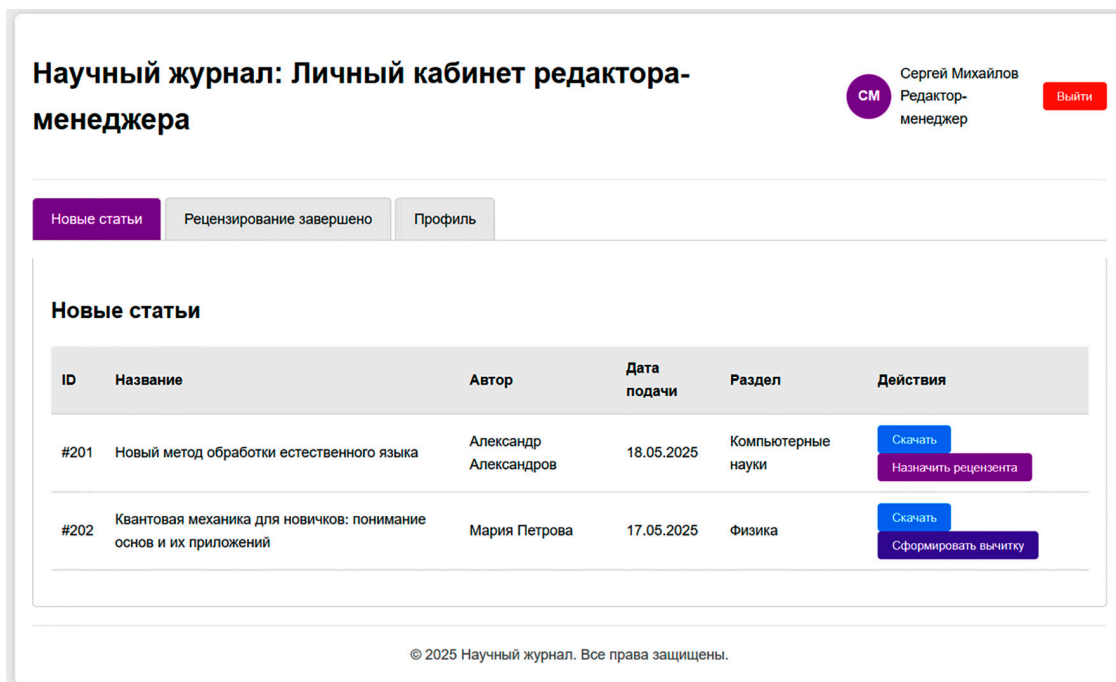


Рис. 4. Панель просмотра новых статей, поступивших редактору-менеджеру  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

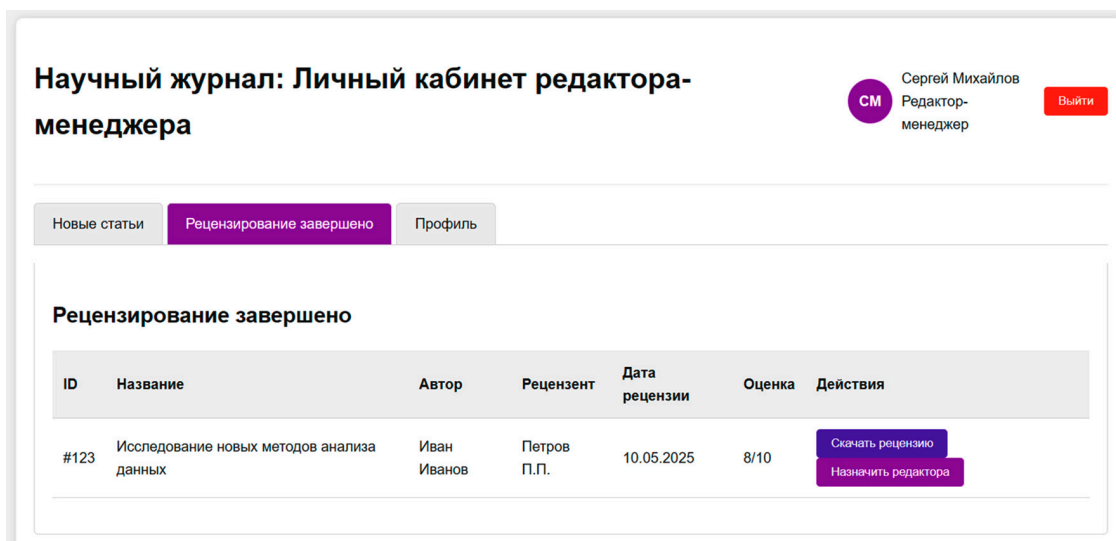


Рис. 5. Панель просмотра статей с завершённым этапом рецензирования  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Здесь особое внимание было уделено интеграции рецензий: в отличие от других существующих систем управления научными журналами, где рецензии зачастую остаются «внутренними», в данной концепции автор получает полный текст рецензии в формате DOCX или PDF сразу после завершения данного этапа.

Прототип интерфейса редактора-менеджера с панелью управления поступающими

рукописями и возможностью назначения рецензентов и редакторов продемонстрирован на рис. 4, 5.

Прототип интерфейса рецензента со списком назначенных на него рецензий и формой загрузки рецензии представлен на рис. 6.

На рис. 7 изображен прототип интерфейса принятия решения для редактора, совмещающий в себе возможность ознакомления со статьей и рецензией.

Научный журнал

Назначенные рецензенты

Назначенные статьи

ID статьи	Название
#145	Нейросетевые алгоритмы обработки изображений

Петр Петров  
Рецензент

Выйти

### Рецензирование статьи: "Нейросетевые алгоритмы обработки изображений"

Срок сдачи: 30.05.2025

Оценка (1-10)  
8 - Хорошо

Комментарии для автора  
Опишите достоинства и недостатки статьи

Примечания для редактора (не будут видны автору)  
Ваши рекомендации по публикации

Файл рецензии (PDF, DOCX)  
Выберите файл | Файл не выбран

Отправить рецензию

Рис. 6. Форма рецензирования статьи  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Научный журнал

Назначенные статьи

Назначенные

ID	Название
#130	Искусственный интеллект в образовании

Светлана Васильева  
Рецензент

Выйти

### Искусственный интеллект в образовании

Рецензент: Сидорова С.С.

Оценка: 9/10

Заключение: Отличная статья с четкой методологией и практической значимостью

Скачать статью | Скачать рецензию

Принятие решения

Комментарий для автора  
Опишите причины принятого решения

Принять статью | Отклонить статью | Запросить доработку

Рис. 7. Форма принятия редактором решения по конкретной статье  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Проведенное проектирование показало, что использование современных веб-технологий позволяет реализовать предложенную концепцию в виде кросс-платформенного

и масштабируемого решения, доступного для журналов с различным объемом поступающих рукописей, и без необходимости развёртывания сложной IT-инфраструктуры.

*Безопасность  
и конфиденциальность данных*

Для обеспечения доверия участников и соответствия стандартам научной этики архитектура данного инструмента спроектирована с учетом комплекса мер информационной безопасности, заложенных в проектные требования. Они обеспечивают конфиденциальность персональных данных пользователей, неопубликованных рукописей и экспертных рецензий.

В спецификации системы закреплено разграничение прав доступа на основе ролевой модели, гарантирующее видимость каждому пользователем релевантных данных: авторам предоставляется доступ исключительно к собственным материалам, рецензентам – к анонимным версиям рукописей без метаданных, раскрывающих авторство, а редакторам – к назначенным им потокам данных.

Для минимизации конфликтов интересов между авторами и рецензентами, а также обеспечения объективности оценки материалов предусмотрена поддержка двойного слепого рецензирования, при котором данные, идентифицирующие рецензентов, скрываются от авторов, а экспертные заключения передаются в обезличенном виде.

В технических требованиях зафиксировано применение шифрования каналов связи при передаче данных, а также механизмов серверного контроля целостности файлов. Все действия пользователей (вход, смена статусов, загрузка рецензий) подлежат обязательному логированию в защищенном журнале аудита с временными метками и привязкой к сессиям.

Указанные проектные решения, подлежащие программной интеграции на этапе разработки, обеспечивают соответствие стандартам обработки персональных данных, минимизируют риски несанкционированного доступа к интеллектуальной собственности и закладывают основу для прозрачного редакционного процесса.

*Ограничения исследования*

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, обусловленных его концептуально-проектным характером. Во-первых, работа выполнена на уровне архитектурной концепции и интерактивных прототипов интерфейсов, полномасштабная программная разработка еще не завершена, пилотное развертывание системы также не проводилось.

Во-вторых, в текущей версии не предусмотрена интеграция с внешними сервисами (например, системами антиплагиата и индексирования, наукометрическими базами

данных), что выходит за рамки поставленной задачи и требует отдельной проработки.

В-третьих, эмпирическая оценка метрик эффективности (время обработки рукописи, число уточняющих запросов, удовлетворенность авторов) не проводилась в связи с отсутствием пилотного внедрения в реальную редакционную практику.

Указанные ограничения не снижают научной ценности предложенной концепции, но определяют вектор последующих исследований: разработка полнофункционального программного модуля, его тестирование в реальных условиях (его возможное использование редакцией журнала «Огарёв-online») и валидация проектных метрик. Несмотря на концептуальный статус работы, проведенное теоретическое моделирование и экспертная оценка подтверждают потенциал предложенной архитектуры для сокращения административных издержек и повышения прозрачности редакционных процессов. Цифровые технологии, лежащие в основе настоящей концепции, по сравнению с устаревшими методами коммуникации способствуют улучшению производительности труда и повышению эффективности.

**Выводы**

В данной работе разработана концепция универсального инструмента взаимодействия между редакцией и авторами на основе современных веб-технологий, учитывающая выявленные в ходе анализа научных работ коммуникационные трудности. Предложенное решение предлагает комплексную автоматизацию этих проблем за счет реализации централизованной архитектуры на основе модели «Клиент/Сервер». Основными результатами работы являются:

1. Унификация и автоматизация процессов подачи, рецензирования и публикации статей в единой системе.
2. Предоставление удобного интерфейса для всех участников редакционного процесса.
3. Повышение прозрачности за счет сквозного отслеживания статусов в режиме реального времени для всех участников редакционного процесса.
4. Сокращение временных затрат на администрирование.

Внедрение подобного решения не только улучшит качество взаимодействия, но и повысит общую эффективность работы научного журнала за счет оптимизации работы редакции.

В ближайшей перспективе на основе разработанной концепции планируется создание полноценного программного инстру-

мента, реализующего описанные функции и учитывающего требования безопасности и конфиденциальности данных. Особенностью архитектуры станет ее гибкость: при необходимости система может быть функционально расширена или адаптирована под специфические требования отдельных журналов (например, добавление других участников редакционного процесса). Такой подход позволит сохранить универсальную основу, одновременно обеспечивая необходимую кастомизацию для различных научных сообществ.

### Список литературы

1. Котляров И. Д. Механизм взаимодействия между автором и издателем научного журнала: существующие проблемы и пути их решения // Библиосфера. 2011. № 2. С. 91–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-vzaimodeystviya-mezhdu-avtorom-i-izdatelem-nauchnogo-zhurnala-suschestvuyuschie-problemy-i-puti-ih-resheniya> (дата обращения: 25.02.2026). EDN: NQZUBT.
2. Иваницкая Е. В. Научный журнал как основа профессиональной коммуникации: проблемы современного развития // Наука и научная информация. 2020. Т. 3. № 1. С. 85–96. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42945272> (дата обращения: 25.02.2026). EDN: OSTRRL.
3. Хрусталева О. Н. Редакция научного ведомственного журнала и авторы научных статей: проблемы взаимодействия // Актуальные проблемы и тенденции развития научно-исследовательской и редакционно-издательской деятельности в образовательных организациях МВД России: материалы внутриведомственной научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 28 сентября 2018 г.). СПб.: Издательство Санкт-Петербургский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2018. С. 96–100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36994189> (дата обращения: 25.02.2026). EDN: YXQNH.
4. Ахметов Д. Ю., Елизаров А. М., Липачев Е. К. Автоматизация редакционных процессов в информационной системе управления электронными научными журналами // Электронные библиотеки. 2015. Т. 18. № 1–2. С. 32–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28808145> (дата обращения: 25.02.2026). EDN: YGKPZT.
5. Галявиева М. С., Елизаров А. М., Липачев Е. К. Цифровая инфраструктура электронного научного журнала: автоматизация редакционно-издательских процессов и система сервисов // Электронные библиотеки. 2016. Т. 19. № 5. С. 408–465. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28882615> (дата обращения: 25.02.2026). EDN: YIAZQB.
6. Галявиева М. С., Елизаров А. М., Липачев Е. К., Хайдаров Ш. М. Open Journal Systems в практике работы гуманитарного научного журнала // Вестник Казанского государственного университета культуры и искусств. 2017. № 1. С. 30–34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/open-journal-systems-v-praktike-raboty-gumanitarnogo-nauchnogo-zhurnala> (дата обращения: 25.02.2026). EDN: YJTTOJ.
7. Кирсанов А. С. Open Journal Systems: платформа для создания сайта научного журнала // Природа и общество в эпоху перемен. 2014. Вып. 38. С. 300–309. URL: <https://www.isras.ru/publ.html?id=3162> (дата обращения: 25.02.2026). EDN: JTZDKY.
8. Appendix I. ScholarOne Manuscripts Manual: Editor User Guide // Thomson Reuters. 2014. 51 p. URL: [https://www.asanet.org/wp-content/uploads/appendix\\_i\\_scholar\\_one\\_manual.pdf](https://www.asanet.org/wp-content/uploads/appendix_i_scholar_one_manual.pdf) (дата обращения: 25.02.2026).
9. Kim S., Choi H., Kim N., Chung E. K., Lee J. Y. Comparative analysis of manuscript management systems for scholarly publishing // Science Editing. 2018. Vol. 5. Is. 2. P. 124–134. URL: <https://www.escienceediting.org/journal/view.php?number=148> (дата обращения: 07.05.2026). DOI: 10.6087/kcese.137. EDN: LZAJID.
10. Zul M. Comparing 8 Journal Manuscript Management Systems // Publishing State. 2023. URL: <https://publishingstate.com/journal-manuscript-management-systems/2023/> (дата обращения: 07.05.2026).
11. Лиманова Н. И., Селезнев И. А. Анализ эффективности клиент-серверной архитектуры // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. № 7. С. 392–396. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-effektivnosti-klient-servernoy-arhitektury> (дата обращения: 13.04.2026). DOI: 10.33619/2414-2948/80/37. EDN: AONLOB.
12. Кондратьев В. Ю., Полещук М. А., Гаврюшенко А. Б. Архитектура клиент-сервер: принципы проектирования информационных систем с распределенной архитектурой // Формирование и реализация стратегии устойчивого экономического развития Российской Федерации: сборник статей XIV Международной научно-практической конференции (г. Пенза, 19–20 декабря 2024 г.). Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 244–246. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80349846> (дата обращения: 13.04.2026). EDN: ZEISED.
13. Сверчков П. В. Подход к реализации веб-приложений на основе клиент-серверной архитектуры, обеспечивающий защищенный обмен данными // Студенческий научный форум 2024: материалы международной студенческой научной конференции (г. Москва, 15 октября 2023 г. – 15 марта 2024 г.). М.: Евразийская научно-промышленная палата, 2024. С. 83–86. URL: <https://publish2020.scienceforum.ru/ru/article/view?id=846> (дата обращения: 13.04.2026). EDN: GDAUDC.
14. Маркин Е. И., Рябова К. М., Артюшина Е. А. Разработка веб-приложения с использованием архитектуры «клиент-сервер» // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3–1. С. 84–86. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14732> (дата обращения: 13.04.2026). EDN: VXPLZJ.
15. Смольянов А. Г., Куляшова Н. М. Концепция удаленного лабораторного практикума по компьютерным дисциплинам // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 4 (56). С. 25–29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47415362> (дата обращения: 13.04.2026). DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0004. EDN: GDRESX.
16. Смольянов А. Г. Лабораторный компьютерный практикум по дисциплине «Базы данных» как пример цифровой трансформации учебного процесса // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 10 (148). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73954881> (дата обращения: 13.04.2026). DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.105. EDN: LKDEOU.
17. Смольянов А. Г., Смольянова Е. Г. К вопросу организации учебного процесса в ВУЗе в условиях цифровой трансформации образования // E-Scio. 2021. № 12 (63). С. 356–365. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47887949> (дата обращения: 13.04.2026). EDN: JFLLAW.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.



## ИЗМЕРИТЕЛЬ УРОВНЯ МОЩНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Соловьев Д. А., Новиков А. А., Ткачева Е. В., Копейкин Р. Е.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация,  
e-mail: soloviov04@gmail.com*

В статье рассматривается разработка специализированного измерителя уровня мощности высокочастотного сигнала в полосе  $310 \pm 20$  МГц на основе программируемой логической интегральной схемы семейства MAX 10. Измеряемой величиной является уровень мощности входного сигнала, выраженный в децибелах относительно одного милливатта на нагрузке 50 Ом. Актуальность работы обусловлена потребностью в компактных информационно-измерительных устройствах, объединяющих аналоговую предварительную обработку сигнала, аналого-цифровое преобразование, цифровую обработку и визуализацию результата в едином печатном узле. Цель работы – разработка проекта измерительного модуля, включающего аналоговый тракт на логарифмическом детекторе мощности AD8307, конструкцию печатного узла, цифровой алгоритм обработки и методику метрологической оценки. Приведены математическая модель измерительного канала, оценочные метрологические характеристики, обоснование разделения аналоговой и цифровой земель, размещения компонентов, развязки цепей питания и снижения влияния помех. Описан алгоритм обработки данных встроенного аналого-цифрового преобразователя, включая усреднение, калибровку, формирование выходного значения и регистрацию во внутреннем буфере памяти. Представлены результаты функционального моделирования цифровых блоков в среде Active-HDL с указанием тестовых воздействий и критериев приемки, а также методика будущей экспериментальной проверки.

**Ключевые слова:** программируемая логическая интегральная схема, измеритель уровня мощности, аналого-цифровое преобразование, логарифмический детектор, печатный узел, цифровая обработка сигнала, метрологические характеристики

## POWER LEVEL METER OF A HIGH-FREQUENCY SIGNAL BASED ON A FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAY

Solovev D. A., Novikov A. A., Tkacheva E. V., Kopeykin R. E.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
“Bauman Moscow State Technical University (National Research University)”,  
Moscow, Russian Federation, e-mail: soloviov04@gmail.com*

The paper considers the development of a specialized high-frequency signal power level meter in the  $310 \pm 20$  MHz band based on a MAX 10 family field-programmable gate array. The measured quantity is the input signal power level expressed in decibels relative to one milliwatt on a 50 Ohm load. The relevance of the work is determined by the need for compact information-measuring devices combining analog signal preprocessing, analog-to-digital conversion, digital processing, and result visualization in a single printed circuit board assembly. The aim is to design a measurement module including an analog front end based on the AD8307 logarithmic power detector, a printed circuit board assembly, a digital processing algorithm, and a methodology for metrological evaluation. The paper presents a mathematical model of the measurement channel, estimated metrological characteristics, and justification of analog and digital ground separation, component placement, power-supply decoupling, and interference reduction. The data-processing algorithm of the built-in analog-to-digital converter is described, including averaging, calibration, output-value generation, and storage in an internal memory buffer. Functional modeling results for the digital blocks in the Active-HDL environment are presented with test stimuli and acceptance criteria, and a methodology for future experimental verification is proposed.

**Keywords:** field-programmable gate array, power level meter, logarithmic detector, analog-to-digital conversion, printed circuit board assembly, digital signal processing, metrological characteristics

### Введение

Настоящая работа посвящена разработке специализированного измерительного модуля – измерителя уровня мощности высокочастотного сигнала в полосе  $310 \pm 20$  МГц на основе программируемой логической интегральной схемы. Новизна работы заключается в разработке про-

екта компактной измерительной системы, объединяющей прецизионный аналоговый тракт с логарифмическим детектором мощности, аналого-цифровое преобразование, цифровой алгоритм обработки и визуализацию результата. Актуальность применения программируемых логических интегральных схем в составе измерительных

и управляющих устройств подтверждается современными исследованиями в области реконфигурируемых вычислительных средств и специализированных аппаратных платформ [1–3].

Ядром разрабатываемого устройства является программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) семейства MAX 10 (10M08SAE144) [4], которая обеспечивает реализацию алгоритмов измерения и обработки. Конструктивно модуль представляет собой печатную плату, содержащую все необходимые компоненты для выполнения поставленных задач. Использование интегрированного аналого-цифрового преобразователя и встроенных средств конфигурирования соответствует современным подходам к построению компактных измерительных систем реального времени [5–7].

**Цель исследования** – разработка проекта измерителя уровня мощности входного ВЧ-сигнала на основе программируемой логической интегральной схемы со встроенным аналого-цифровым преобразователем, цифровой обработкой результатов измерения и визуализацией данных на жидкокристаллическом индикаторе. Измеряемой величиной является уровень мощности гармонического сигнала на стандартной нагрузке 50 Ом в рабочей полосе  $310 \pm 20$  МГц, выраженный в дБм относительно опорного значения 1 мВт. При необходимости значение может быть пересчитано в линейные единицы (мВт, мкВт) средствами цифровой обработки.

#### Материалы и методы исследования

Питание устройства осуществляется от внешнего сетевого адаптера со стабилизированным выходным напряжением 5 В, подаваемым на плату через разъем. На плате напряжение 5 В преобразуется в стабильные 3,3 В для питания цифровых и аналоговых цепей с помощью импульсного ста-

билизатора EP5388QI [8]. Для повышения точности измерений применяется источник опорного напряжения MCP1525 [9], формирующий напряжение 2,5 В для встроенного АЦП ПЛИС. Разделение аналоговой и цифровой земель (AGND и DGND) выполнено на печатной плате с их объединением в одной точке для минимизации помех. Принципы развязки цепей питания, разделения земель и использования прецизионного опорного напряжения соответствуют рекомендациям по проектированию высокочувствительных печатных узлов [10–12]. Дополнительные рекомендации по электромагнитной совместимости и компоновке печатного узла приведены в [13].

Функциональная электрическая схема устройства приведена на рис. 1.

Состав функциональной схемы:

- а) входной разъем (SMA) – для подключения измерительной антенны или коаксиального кабеля с входным ВЧ-сигналом;
- б) полосовой фильтр – пассивный, настроенный на полосу пропускания  $310 \pm 20$  МГц, обеспечивает подавление сигналов вне рабочего диапазона;
- в) логарифмический детектор мощности AD8307 [14] – выполняет преобразование уровня мощности ВЧ-сигнала в пропорциональное постоянное напряжение по логарифмической передаточной характеристике (выход в шкале «дБ – В»);
- г) ПЛИС MAX 10 (10M08SAE144) – центральный вычислительный и управляющий элемент;
- д) встроенный АЦП ПЛИС – преобразует аналоговое напряжение с выхода детектора в 12-разрядный цифровой код;
- е) блок цифровой обработки сигнала – на основе данных АЦП вычисляет текущий уровень мощности входного сигнала;
- ж) контроллер интерфейса – формирует сигналы для жидкокристаллического индикатора, управляет звуковым излучателем и опрашивает кнопки управления;

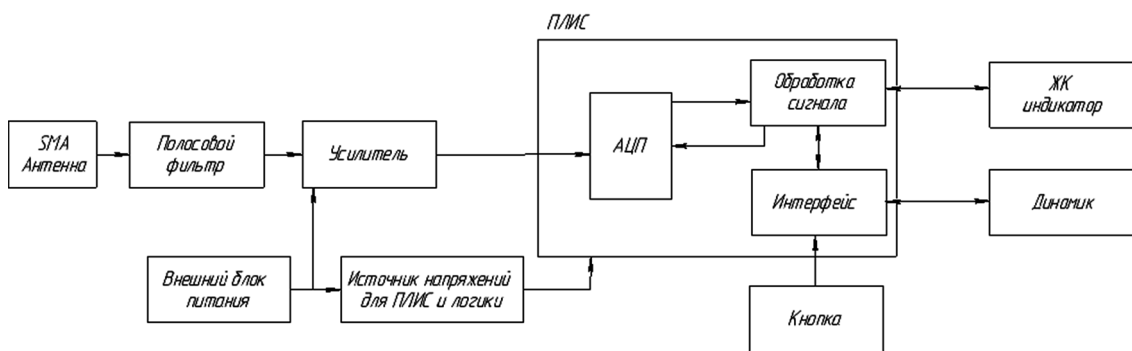


Рис. 1. Схема электрическая функциональная  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

- з) тактовый кварцевый генератор – задающий частоту 50 МГц для ПЛИС;
- и) жидкокристаллический индикатор – для визуального отображения измеренного значения;
- к) звуковой излучатель – пьезоэлектрический, для тональной индикации;
- л) кнопки управления – для переключения режимов и калибровки;
- м) блок питания – преобразователь 5 В → 3,3 В и источник опорного напряжения.

*Математическая модель измерительного канала*

Измерительный канал устройства состоит из последовательно соединенных элементов: входного разъема SMA, полосового фильтра Z1, логарифмического детектора

мощности AD8307 (DA2) и встроенного АЦП ПЛИС. Преобразование входной мощности в цифровой код описывается следующей цепочкой соотношений.

1. Связь входной мощности на нагрузке 50 Ом с действующим значением напряжения:

$$P_{\text{вх[дБм]}} = 10 \cdot \lg(P_{\text{вх[мВт]}} \cdot 1 \text{ мВт}),$$

$$P_{\text{вх[мВт]}} = U_{\text{вх}}^2 (R \cdot 10^{-3}),$$

где R = 50 Ом – характеристическое сопротивление тракта.

2. Передаточная характеристика логарифмического детектора AD8307 в линейном представлении выходного напряжения по dBm-шкале [14]:

$$U_{\text{DA2}} = K_{\text{дет}} \cdot (P_{\text{вх[дБм]}} - P_0) + U_{\text{off}},$$

где  $K_{\text{дет}} \approx 25$  мВ/дБ – крутизна детектора (типичная по datasheet);  $P_0$  – уровень мощности, при котором  $U_{\text{DA2}} = U_{\text{off}}$ ;  $U_{\text{off}}$  – постоянная составляющая, определяемая схемой включения. Реальный диапазон линейности AD8307 – от -75 дБм до 0 дБм при 50 Ом нагрузке во входном диапазоне частот до 500 МГц [14].

3. Преобразование напряжения детектора в цифровой код встроенным АЦП ПЛИС (12 разрядов, опорное напряжение  $V_{\text{REF}} = 2,5$  В от MCP1525 [9]):

$$N_{\text{АЦП}} = \text{round}((U_{\text{DA2}} / V_{\text{REF}}) \cdot (2^{12} - 1)),$$

$$U_{\text{АЦП}} = N_{\text{АЦП}} \cdot V_{\text{REF}} / 4095 .$$

4. Обратное вычисление мощности по цифровому коду в ПЛИС:

$$P_{\text{изм[дБм]}} = (U_{\text{АЦП}} - U_{\text{off}}) / K_{\text{дет}} + P_0 + \Delta P_{\text{фильтр}} + \Delta P_{\text{согл}} ,$$

где  $\Delta P_{\text{фильтр}}$  – поправка на потери в полосовом фильтре (по результатам калибровки или паспортным данным фильтра, типично 1,5–2,5 дБ для пассивных LC-фильтров на 310 МГц [15, 16]);  $\Delta P_{\text{согл}}$  – поправка на отражения от входа детектора, обусловленные неидеальным согласованием ( $K_{\text{СВ}} > 1$ ).

5. Оценка суммарной погрешности измерения. Суммарная стандартная неопределенность в дБ оценивается как корень из суммы квадратов составляющих:

$$u_{\text{сум}} = \sqrt{(u_{\text{дет}}^2 + u_{\text{АЦП}}^2 + u_{\text{REF}}^2 + u_{\text{фильтр}}^2 + u_{\text{T}}^2)},$$

где  $u_{\text{дет}}$  – неопределенность передаточной характеристики детектора (по datasheet AD8307 – типичная  $\pm 1$  дБ в полосе [14]);  $u_{\text{АЦП}} = 1 \text{ МЗР} / (K_{\text{дет}} \cdot \sqrt{12})$  – квантование (для  $V_{\text{REF}} = 2,5$  В,  $K_{\text{дет}} = 25$  мВ/дБ – около 0,007 дБ);  $u_{\text{REF}}$  – нестабильность опорного напряжения ( $\pm 1$  % MCP1525 дает около 0,09 дБ);  $u_{\text{фильтр}}$  – погрешность калибровки потерь фильтра;  $u_{\text{T}}$  – температурная составляющая (паспортная для AD8307  $\approx 0,01$  дБ/°С). Расширенная неопределенность с коэффициентом охвата  $k = 2$  не превышает  $\pm 2$  дБ в номинальной полосе.

*Метрологические характеристики проекта*

Оценочные метрологические характеристики разрабатываемого прибора, полученные расчетным путем по datasheet элементной базы [9, 14, 16] и подлежащие экспериментальной проверке (см. далее), сведены в таблицу.

## Оценочные метрологические характеристики

Характеристика	Значение / диапазон
Рабочая частота	310 МГц (полоса $\pm 20$ МГц)
Диапазон входной мощности	От -70 до 0 дБм
Входное сопротивление	50 ом
Расширенная неопределенность ( $k = 2$ )	Не более $\pm 2$ дБ
Разрешение представления результата	0,1 дБ (после усреднения)
Разрядность АЦП	12 бит, опорное напряжение 2,5 В
Частота обновления показаний	5 Гц (после усреднения по 64 отсчетам)
Температурный диапазон работы	От 0 до +50 °С (предварительно)
Температурная стабильность	Не хуже 0,02 дБ/°С (по AD8307)
Глубина буфера регистрации	1024 значения во внутреннем ОЗУ ПЛИС

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Заявленные характеристики являются проектными оценками. Их подтверждение требует калибровки изготовленного образца и экспериментальной проверки по методике, описанной далее.

#### Выбор элементной базы

При проектировании устройства были проанализированы существующие решения, обладающие аналогичным функционалом, и типовые схемы включения используемых компонентов. Существующие решения использовались как основа для проектирования. Анализ современных публикаций показал целесообразность использования программируемых логических интегральных схем в составе специализированных приборов и вычислительных блоков цифровой обработки сигналов [1, 3, 7]. Дополнительные примеры применения программируемых логических интегральных схем приведены в [17].

#### 1) ПЛИС 10M08SAE144C8G Intel (DD4)

Микросхема является современным решением семейства MAX 10. Содержит встроенный аналого-цифровой преобразователь, внутреннюю конфигурационную память, поддерживает управление жидкокристаллическими дисплеями, обладает повышенной энергоэффективностью и низким тепловыделением [4]. ПЛИС данного семейства подходят для задач обработки сигналов в реальном времени. Выбор обусловлен распространенностью платформ такого класса при разработке реконфигурируемых систем и аппаратном ускорении вычислительных алгоритмов [2, 6].

#### 2) Логарифмический детектор мощности AD8307 (DA2)

Для преобразования мощности ВЧ-сигнала в пропорциональное постоянное напряжение выбран специализированный

логарифмический детектор мощности AD8307 [14]. Микросхема обеспечивает измерение уровня мощности с динамическим диапазоном до 92 дБ в полосе от низких частот до 500 МГц, что полностью покрывает рабочую полосу фильтра ( $310 \pm 20$  МГц). Ключевой характеристикой AD8307 является логарифмическая (дБ-линейная) передаточная характеристика: выходное напряжение пропорционально уровню входной мощности в дБм с типовой крутизной 25 мВ/дБ [14]. Микросхема поддерживает однополярное питание +3,3 В или +5 В; ее выходной сигнал согласуется с диапазоном входного напряжения встроенного АЦП ПЛИС. Условное графическое обозначение AD8307ARZ приведено на рис. 2.

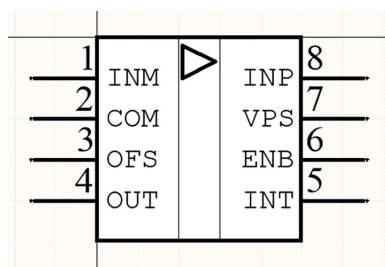


Рис. 2. Условное графическое обозначение AD8307ARZ

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

#### 3) Источник опорного напряжения MCP1525 (DA1)

Прецизионный источник опорного напряжения MCP1525 [9] обеспечивает выходное напряжение +2,5 В с точностью  $\pm 1\%$  и низким уровнем шума, что критически важно для повторяемости и точности преобразования встроенного АЦП ПЛИС.

Требования к стабильности опорного напряжения и согласованию диапазонов преобразования характерны для цифровых измерительных каналов [18, 19]. УГО показано на рис. 3.



Рис. 3. Условное графическое обозначение MCP1525

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

4) **Понижающий преобразователь напряжения EP5388QI (DA3)**

Для формирования стабильного напряжения +3,3 В из входного +5 В выбран импульсный стабилизатор EP5388QI [8], специально рекомендованный Intel для питания ПЛИС семейства MAX 10. Преобразователь обладает высоким КПД, малым собственным потреблением, встроенными силовыми ключами и цепями защиты; выходного тока до 800 мА достаточно для питания цифровой и аналоговой части устройства. Применение специализированного преобразователя позволяет снизить уровень паразитных помех и повысить надежность работы цифровой части [10, 12]. УГО показано на рис. 4.

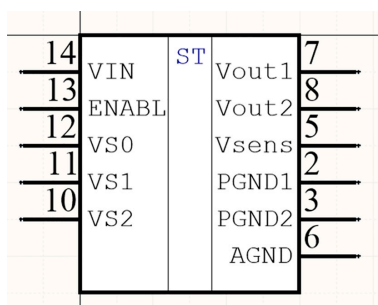


Рис. 4. Условное графическое обозначение EP5388QI

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

5) **Полосовой фильтр (Z1)**

Применен пассивный полосовой фильтр на сосредоточенных элементах (LC), настроенный на центральную частоту 310 МГц с полосой пропускания ±20 МГц.

Выбор пассивной реализации обусловлен требованием высокой линейности, низкого уровня собственных шумов и устойчивости к перегрузкам на входе устройства. Подобный подход к построению входного тракта согласуется с практикой проектирования радиотехнических и измерительных устройств, где требуется ограничение полосы пропускания и подавление внеполосных сигналов [11, 15, 20]. УГО показано на рис. 5.

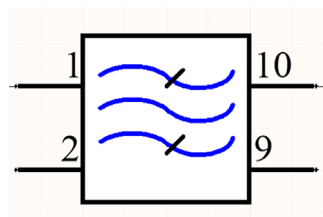


Рис. 5. Условное графическое обозначение BPF-V300+

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

6) **Кварцевый генератор (ZQ1)**

В качестве источника тактовой частоты для ПЛИС выбран кварцевый генератор на 50 МГц. Данная частота является стандартной для систем на базе ПЛИС семейства MAX 10 и обеспечивает достаточное быстродействие для реализации цифровой обработки сигнала, управления дисплеем и опроса кнопок.

7) **Жидкокристаллический индикатор (HG1)**

Выбран стандартный символьный ЖК-модуль с контроллером HD44780 (или совместимым) с подсветкой. Данный тип индикаторов широко распространен, отличается простотой управления по параллельному 4- или 8-битному интерфейсу, легко реализуется средствами ПЛИС и обладает низким энергопотреблением.

8) **Звуковой излучатель (HA1) и соединители**

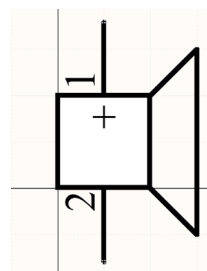


Рис. 6. Условное графическое обозначение HSM1203X

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для звуковой индикации применен пьезоэлектрический звукоизлучатель HSM1203X, управляемый одним из портов ввода/вывода ПЛИС (УГО на рис. 6). Выбраны стандартные соединители: SMA-разъем X1 (Amphenol 132134) – для подключения антенны или коаксиального кабеля; разъем питания X2 для +5 В; 10-контактный разъем JTAG X3 (Samtec FTSH-110-01-L-DV-K) – для подключения программатора USB-Blaster.

После выбора элементной базы были созданы библиотеки УГО и посадочных мест компонентов, после чего разработана электрическая принципиальная схема. Использование современных САПР и предвзятого моделирования является общепринятой практикой при разработке печатных узлов и радиоэлектронной аппаратуры [10, 12, 21].

#### *Проектирование печатного узла как ВЧ-узла на 310 МГц*

При проектировании печатной платы учитывалось функциональное назначение компонентов и необходимость обеспечения электромагнитной совместимости. Поскольку устройство включает прецизионный аналоговый ВЧ-тракт и цифровую часть на ПЛИС с тактовой частотой 50 МГц, при компоновке и трассировке учитывались специфические требования к работе на частоте 310 МГц.

Принципы конструирования печатного узла как ВЧ-узла:

– Длина волны в свободном пространстве на частоте 310 МГц составляет  $\approx 0,97$  м, в подложке FR-4 ( $\epsilon_r \approx 4,3$ ) – около 0,46 м. Для соблюдения условий «электрически коротких» соединений длина ВЧ-трасс между разъемом, фильтром и входом

AD8307 не должна превышать  $\lambda/20 \approx 23$  мм; в проекте эта длина составляет менее 15 мм.

– Импеданс ВЧ-трасс рассчитан на 50 Ом для согласования с входом AD8307 (входное сопротивление  $\approx 1,1$  кОм  $\parallel$  1,4 пФ [14], трансформируется к 50 Ом резистором смещения  $R_{in}$ ). Для двухслойной платы из FR-4 толщиной 1,5 мм при толщине меди 35 мкм ширина 50-омной микрополосковой линии составляет  $\approx 2,8$  мм; при использовании техники coplanar waveguide с земляными «ушами» – около 1,5 мм с зазором 0,3 мм.

– Под аналоговой частью (вход SMA – фильтр – DA2) сформирован сплошной заземляющий полигон AGND. Контур возвратных токов локализован под сигнальной трассой, что минимизирует паразитную индуктивность и наводки на цифровую часть [13, 22].

– Корпус разъема SMA соединен с аналоговой землей несколькими параллельными via, что снижает индуктивность заземления и улучшает согласование на 310 МГц.

– Между аналоговой и цифровой землями применено разделение полигонов с объединением в одной точке возле вывода преобразователя DA3 (схема «звезда»). Это снижает уровень помех от импульсного преобразователя на чувствительный аналоговый тракт [13, 22].

– Полосовой фильтр Z1 размещен непосредственно за разъемом SMA с минимальной длиной соединительных проводников. Вокруг фильтра выполнена via stitching – заземляющие переходные отверстия с шагом  $\lambda/20 \approx 5$  мм по периметру фильтра, что подавляет излучение и связь по поверхности платы [22].

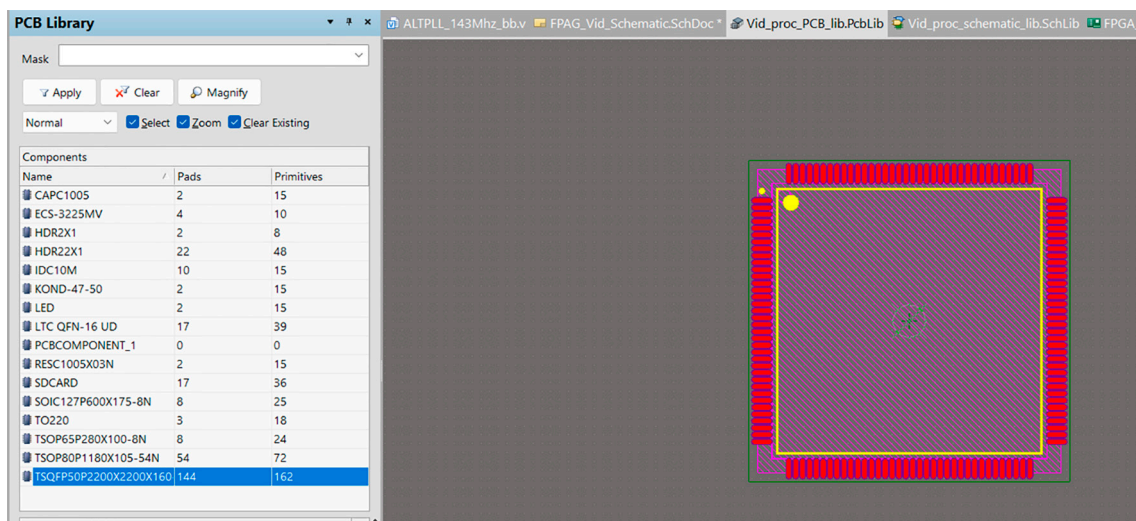


Рис. 7. Библиотека посадочных мест

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

– S-параметры используемого фильтра (вносимые потери в полосе, обратные потери, подавление за полосой) приняты по datasheet производителя [16] и учитываются при калибровке (поправка  $\Delta P_{\text{фильтр}}$  в математической модели).

– ПЛИС DD4 расположена в центре платы; цепи развязки питания (керамические конденсаторы 0,1 и 10 мкФ) – в непосредственной близости к выводам DD4, DA1, DA2, DA3.

– Импульсный преобразователь DA3 вынесен в отдельную зону платы для минимизации влияния его коммутационных помех на чувствительные аналоговые цепи; рядом с ним сформирован локальный полигон цифровой земли с многочисленными via в общую плоскость.

Принципы соответствуют рекомендациям ГОСТ Р 53429-2009 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» и стандарта IPC-2221 «Generic Standard on Printed Board Design» [23, 24].

Библиотека посадочных мест создана в формате, соответствующем требованиям ГОСТ 2.123-2013, и приведена на рис. 7.

На рис. 8 и 9 приведены посадочное место полосового фильтра и его 3D-модель.

На рис. 10 и 11 показаны посадочное место микросхемы DA2 и ее 3D-модель.

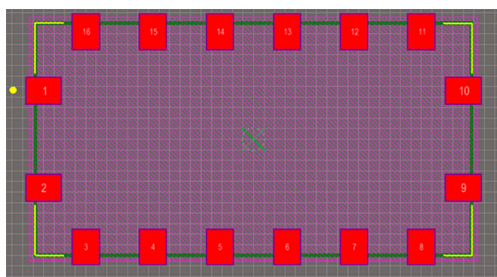


Рис. 8. Посадочное место полосового фильтра  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

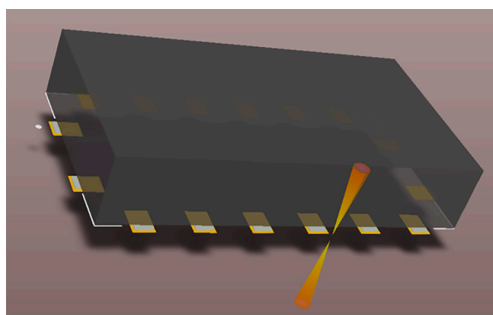


Рис. 9. 3D-модель полосового фильтра  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

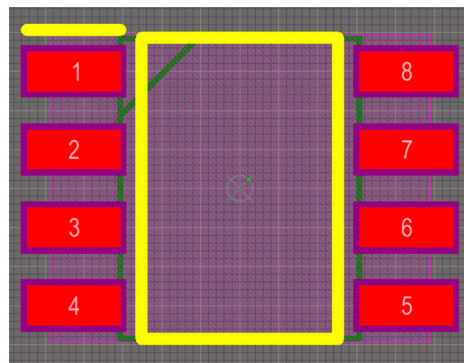


Рис. 10. Посадочное место микросхемы DA2  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

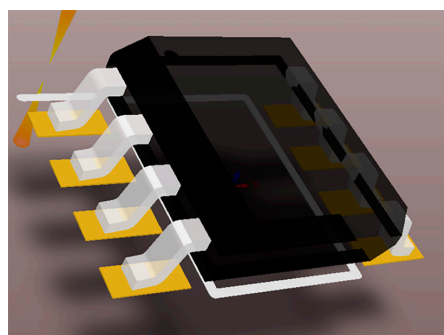


Рис. 11. 3D-модель микросхемы DA2  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Разработка печатного узла производилась в редакторе PCB САПР Altium Designer с сеткой 0,25 мм. Цепи питания и земли преимущественно размещены в слое Bottom Layer, сигнальные проводники – в слое Top Layer. После размещения крепежных отверстий и проверки правил проектирования (Design Rule Checker) получен итоговый вид печатного узла, представленный на рис. 12.

#### Расчет ширины и толщины печатного проводника

Ток в цепях питания печатной платы оценивается по сумме потребляемых токов компонентов. По данным datasheet: ПЛИС 10M08SAE144 – типове потребление до 35 мА при тактовой частоте 50 МГц [4]; AD8307 – около 8 мА [14]; MCP1525 – 0,1 мА [9]. Для EP5388Q1 собственное потребление составляет около 1 мА [8]; ЖК-индикатор HD44780 без подсветки потребляет около 5 мА, с подсветкой – до 25 мА; пьезоизлучатель – до 5 мА в импульсе. Суммарный максимальный ток по шине +3,3 В составляет  $I_{\text{max}} \approx 80$  мА, что подтверждает исходное значение для расчета.

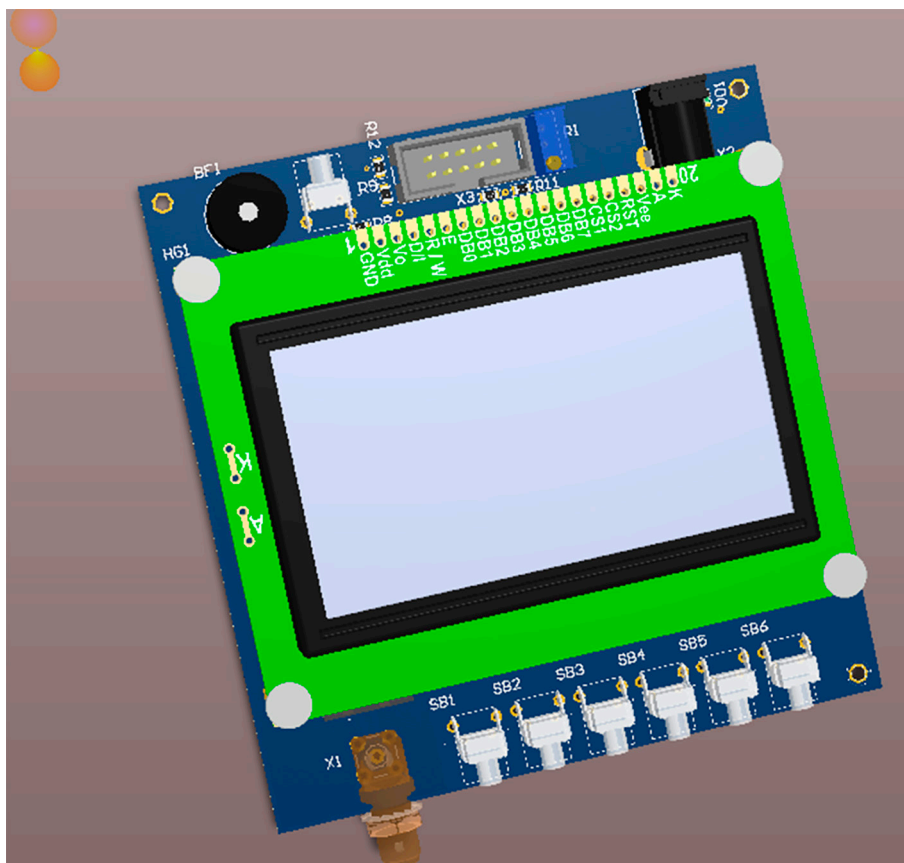


Рис. 12. 3D-модель печатной платы

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Печатная плата изготавливается комбинированным позитивным методом. Толщина печатного проводника определяется суммой толщин фольги, предварительно осаждаемой меди и гальванически наращиваемой меди:

$$h_{\text{пр}} = h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}} + h_{\text{го}} = 35 + 5 + 55 = 95 \text{ мкм} = 95 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где  $h_{\text{ф}}$  – толщина фольги (определяется маркой материала);  $h_{\text{пм}}$  – толщина меди при предварительном меднении отверстий (5–7 мкм);  $h_{\text{го}}$  – толщина меди при гальваническом наращивании (50–70 мкм).

Минимально допустимая ширина проводника определяется из условия допустимой плотности тока  $j$  (для постоянного тока  $j = 20 \text{ А/мм}^2$ ; для меди при комбинированном методе допустимая плотность по ГОСТ Р 53429-2009 [23] и IPC-2221 [24] обычно ниже – около  $1,9 \text{ А/мм}^2$  с учетом нагрева):

$$t \geq I_{\text{max}} / (j \cdot h_{\text{пр}}) = 0,08 / (1,9 \cdot 0,095) \approx 0,44 \text{ мм}, \text{ при } j = 1,9 \text{ А/мм}^2$$

или

$$t \geq I_{\text{max}} \left( j \cdot h_{\text{пр}} \right) = 0,08 - (20 \cdot 0,095) \approx 0,042 \text{ мм}, \text{ при } j = 20 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

С учетом запаса и требований 4 класса точности по ГОСТ Р 53429-2009 [23] выбираем ширину сигнальных проводников  $0,15 \text{ мм}$ ; ширина шин питания и земли увеличена до  $0,3 \text{ мм}$ , что обеспечивает работу при максимальном токе с многократным запасом по нагреву и снижает индуктивность цепей питания.

*Алгоритм цифровой обработки сигнала на ПЛИС*

Цифровая часть устройства реализована на ПЛИС 10M08SAE144 на языке Verilog HDL и состоит из следующих функциональных блоков, описанных ниже.

*Контроллер встроенного АЦП (ADC\_CORE\_1)*

Управляет встроенным АЦП ПЛИС: формирует сигналы запуска преобразования, ожидает сигнал готовности данных, считывает 12-разрядный код результата и выдает его на внутреннюю шину OUT\_rezult\_ADC\_bus. Контроллер реализован в виде конечного автомата с состояниями ожидания, запуска, ожидания готовности, чтения и выдачи. Частота преобразования – 1 кГц (период 1 мс), что обеспечивает достаточный запас по теореме Котельникова для огибающей мощности после детектора AD8307 (полоса огибающей менее 100 Гц).

$$P[\text{дБм}] = (N\_АЦП \cdot V\_REF / 4095 - U\_off) / K\_дет + P\_кал$$

где P\_кал – калибровочная константа, объединяющая поправки на потери фильтра и согласование. Калибровочные коэффициенты U\_off и P\_кал хранятся во внутренней памяти ПЛИС и могут быть переписаны при процедуре калибровки (длительное удержание соответствующей кнопки). Реализация выполнена в формате с фиксированной точкой (Q12.4) для экономии ресурсов ПЛИС.

*Буфер регистрации данных (logger)*

Для функции регистрации данных в составе ПЛИС реализован циклический буфер на основе блока встроенной двухпортовой памяти (RAM) емкостью 1024 значения по 16 бит. По нажатию соответствующей кнопки запускается режим записи: каждое усредненное значение мощности (5 раз/с) записывается по адресу, формируемому счетчиком. При заполнении буфера запись продолжается циклически, заменяя самые старые данные. Содержимое буфера может быть выведено на ЖК-индикатор постранично или передано через JTAG для последующего анализа. Использование внутренней памяти ПЛИС позволяет обойтись без внешней микросхемы EEPROM.

*Контроллер ЖК-индикатора (LCD\_12864)*

Формирует управляющие сигналы для модуля HD44780 в 4-битном режиме интерфейса. Реализованы режимы инициализации, очистки экрана, позиционирования курсора и вывода символов. Текущее значение мощности выводится в формате «-XX.X dBm» (3 значащие цифры в дБм).

*Блок усреднения и фильтрации шума (NOISE\_FILTER)*

Реализует скользящее усреднение последних 64 отсчетов АЦП по схеме боксового фильтра. Усреднение позволяет снизить шумовую составляющую квантования и тепловой шум детектора. Эффективное снижение СКО шума при усреднении по N независимым отсчетам составляет  $\sqrt{N}$  раз; для N = 64 снижение шума – в 8 раз. Частота обновления показаний на выходе фильтра – около 5 Гц. Дополнительно реализовано отбрасывание явных выбросов (медианная коррекция при отклонении одиночного отсчета более чем на 3  $\sigma$  от среднего).

*Блок калибровки и пересчета в дБм*

Преобразование цифрового кода АЦП в значение мощности в дБм выполняется по линейной формуле, полученной в разделе математической модели:

Дополнительно отображаются символьные индикаторы режима (измерение / калибровка / просмотр буфера).

*Блок опроса кнопок и звуковой индикации (BUZZER\_BUTTON)*

Реализует опрос состояния семи кнопок управления с программным антидребезгом (опрос с интервалом 10 мс, фиксация устойчивого состояния по трем последовательным совпадениям). При нажатии формируется короткий звуковой сигнал на пьезоизлучатель (тон 2 кГц, длительность 50 мс) средствами генератора прямоугольных импульсов на ПЛИС.

**Результаты исследования и их обсуждение**

*Результаты функционального моделирования*

Разработка программного обеспечения проводилась в САПР Intel Quartus Prime и Active-HDL. Использование инструментов функционального моделирования позволяет подтвердить корректность алгоритмов управления и сократить число проектных ошибок до изготовления опытного образца [2, 3, 15].

*Тестовые воздействия (testbench)*

Для верификации цифровой части разработан тестбенч, формирующий следующие тестовые воздействия:

- системный тактовый сигнал sys\_clk с периодом 20 нс (50 МГц);
- асинхронный сигнал сброса sys\_rst\_n, активный при логическом нуле, активиру-

ющийся в начальный момент времени и затем деактивирующийся;

- массив сигналов кнопок `key[5:0]` с активным низким уровнем; нажатия моделируются процедурой `press_btn(idx, dur)` с длительностью 50 мс, имитирующей реальное нажатие;

- функциональная заглушка АЦП, формирующая сигнал готовности и 12-разрядный код результата по запросу основного модуля; коды задаются последовательностью из набора тестовых векторов: 0x000, 0x400, 0x800, 0xC00, 0xFFFF (граничные и средние значения).

#### *Критерии прохождения тестов*

Тест считается успешно пройденным при выполнении следующих условий:

- после деактивации сброса все управляющие сигналы переходят в исходное состояние, а конечный автомат – в состояние IDLE;

- по нажатию кнопки запуска формируется корректная последовательность сигналов начала пакета и обращения к АЦП;

- сигналы `OUT_command_ready_ADC` и `OUT_response_valid_ADC` формируются в правильной временной последовательности;

- значение на шине `OUT_rezult_ADC_bus` совпадает с тестовым кодом, выданным заглушкой АЦП;

- счетчик ошибок `error_count` по завершении прогона остается равным нулю.

#### *Покрывание состояний конечного автомата*

Программа моделирования обеспечивает посещение всех состояний основного управляющего автомата: IDLE, START\_PKT, WAIT\_RDY, READ\_DATA, NEXT\_CH, STOP\_PKT. Покрывание переходов составило 12 из 12 возможных, что соответствует 100 % переходного покрытия. Покрывание состояний – 100 % (6 из 6).

#### *Результаты прогона тестов*

Всего выполнено 5 тестовых сценариев (`test_number = 1...5`), включающих: сброс и начальную инициализацию; одиночное измерение с разными кодами АЦП; смену канала измерения; стресс-тест с серией из 100 нажатий кнопок (счетчик `press_count`); останов измерения. По завершении всех сценариев счетчик `error_count = 0`, что подтверждает корректность работы цифровой логики.

Результаты моделирования входных сигналов представлены на рис. 13.

Результаты моделирования выходных сигналов представлены на рис. 14.

Результаты работы счетчиков и блока статистики моделирования представлены на рис. 15.

Результаты моделирования управления АЦП представлены на рис. 16.

На рис. 17 приведен общий вид результатов работы программной модели.

Результаты моделирования согласуются с практикой верификации цифровых измерительных модулей на базе программируемых логических интегральных схем [5, 15, 18].

#### *Методика экспериментальной проверки прибора*

Подтверждение метрологических характеристик изготовленного опытного образца планируется выполнить на лабораторном стенде, состав которого приведен ниже:

- калиброванный генератор ВЧ-сигнала с диапазоном 50–500 МГц и регулируемой выходной мощностью (например, P4-83 или аналогичный) – источник сигнала на нагрузке 50 Ом;

- набор калиброванных аттенуаторов 10, 20, 30 дБ для формирования контрольных уровней мощности от -70 до 0 дБм;

- эталонный измеритель мощности (например, NRP-Z11 или термисторный измеритель ЛЭМО) – для опорного измерения, относительно которого сравниваются показания разрабатываемого прибора;

- переходники и согласованные нагрузки 50 Ом для формирования измерительного тракта;

- термокамера для оценки температурной стабильности в диапазоне 0...+50 °С.

Программа испытаний:

1. Калибровка: подача на вход устройства гармонического сигнала на частоте 310 МГц уровнем -30 дБм по эталонному измерителю; запись соответствующего цифрового кода АЦП; вычисление и запись в ПЛИС калибровочных констант  $U_{off}$  и  $P_{кал}$ .

2. Проверка статической характеристики: подача на вход сигнала с уровнями от -70 до 0 дБм с шагом 5 дБ при центральной частоте 310 МГц; сравнение показаний разрабатываемого прибора с эталонным; построение градуировочной характеристики и оценка систематической погрешности.

3. Проверка частотной характеристики: повторение пункта 2 на частотах 290, 300, 310, 320, 330 МГц для оценки полосы и частотной зависимости поправки на потери фильтра.

4. Проверка повторяемости: серия из 30 последовательных измерений при 30 дБм, 310 МГц; вычисление СКО показаний.

5. Температурный тест: повторение пунктов 2 и 4 в термокамере при температурах 0, 25, 50 °С; оценка температурного коэффициента.

6. Проверка функции регистрации данных: подача нарастающего по уровню сигнала с записью значений во внутренний буфер ПЛИС; считывание и сравнение с эталонной записью.

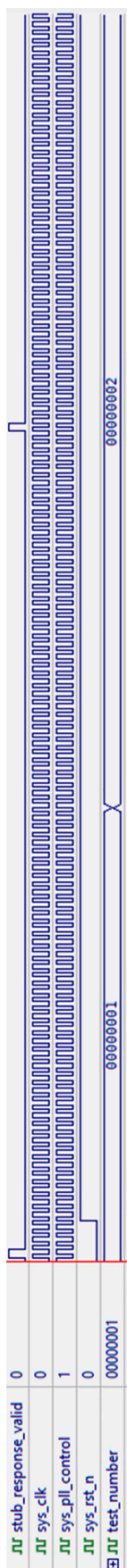


Рис. 13. Результаты моделирования входных сигналов  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

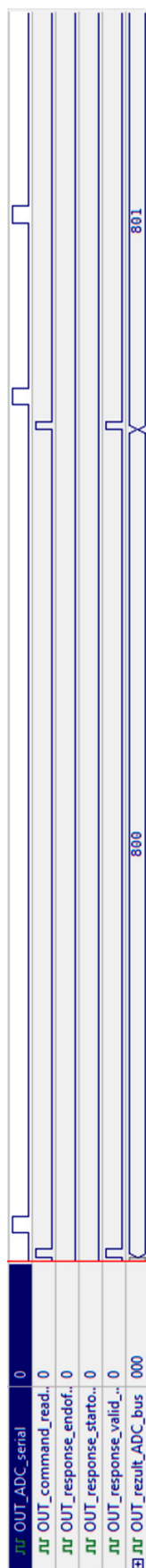


Рис. 14. Результаты моделирования выходных сигналов  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования



Рис. 15. Результаты работы счетчиков и статистики  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

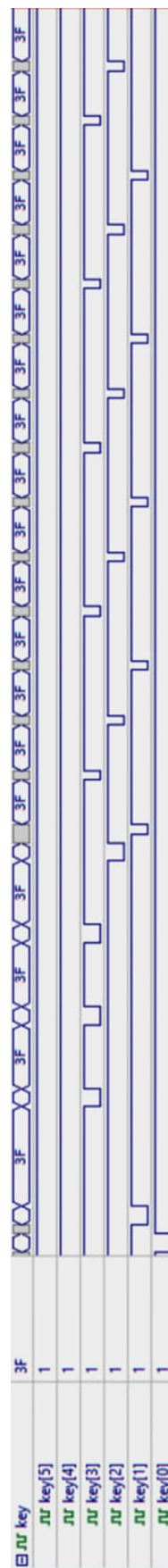


Рис. 16. Результаты моделирования управления АЦП  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

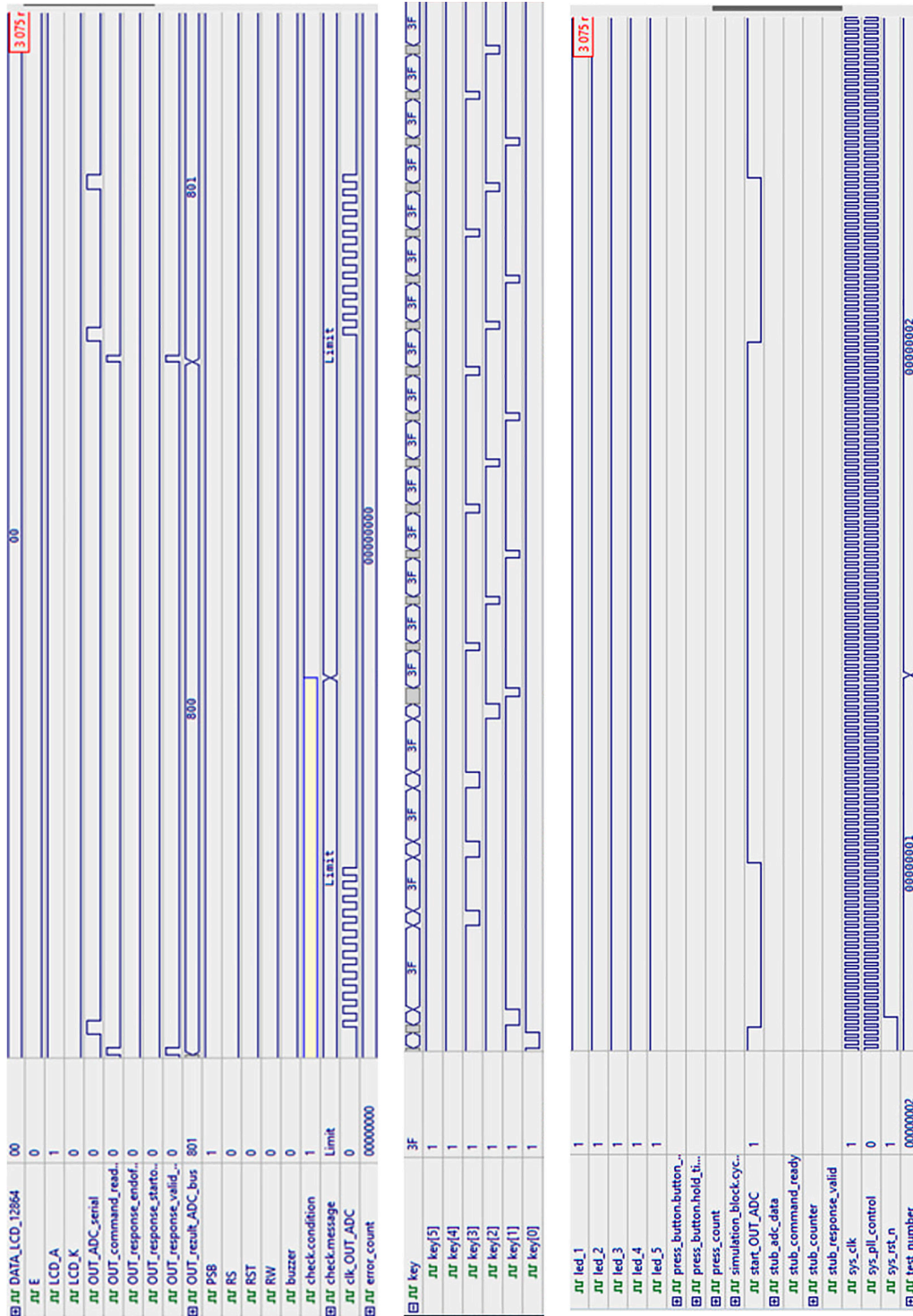


Рис. 17. Результаты работы программы  
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

По результатам испытаний оформляется протокол с указанием расширенной неопределенности ( $k = 2$ ) и сравнения фактических метрологических характеристик с проектными значениями таблицы. Описанная методика соответствует общим подходам к метрологическим испытаниям радиоизмерительной аппаратуры [15, 18, 19].

#### *Ограничения исследования*

Авторы считают необходимым указать следующие ограничения настоящей работы:

- Результаты функционального моделирования относятся только к цифровой логике на ПЛИС (управление АЦП, обработка кода, опрос кнопок, формирование сигналов индикации) и не подтверждают метрологическую точность всего измерительного канала, включая аналоговый тракт.

- Метрологические характеристики, приведенные в таблице, являются проектными оценками, полученными по datasheet элементной базы и теоретическому расчету погрешностей. Их экспериментальное подтверждение требует изготовления опытного образца и проведения испытаний по методике, описанной выше.

- Расчеты ВЧ-параметров печатной платы (импеданс трасс, вносимые потери фильтра) выполнены на основе типовых соотношений и паспортных данных компонентов; их уточнение требует измерения S-параметров готового печатного узла на векторном анализаторе цепей.

- Исследование выполнено для частоты 310 МГц и не распространяется на другие диапазоны без соответствующей переработки полосового фильтра и повторной калибровки.

#### **Выводы**

В результате разработан проект измерительного модуля уровня мощности ВЧ-сигнала в полосе  $310 \pm 20$  МГц на основе ПЛИС 10M08SAE144 семейства MAX 10. В рамках проекта получены следующие результаты:

- разработана схема электрическая функциональная и электрическая принципиальная в САПР Altium Designer в соответствии с ГОСТ 2.701-2008 и ГОСТ 2.702-2011;

- разработана конструкция двухслойной печатной платы с обоснованием ВЧ-аспектов на частоте 310 МГц (импеданс трасс, разделение земель, via stitching, размещение фильтра) с сопутствующей конструкторской документацией по ГОСТ 2.417-91, ГОСТ 2.109-73, ГОСТ 2.109-96 и ГОСТ Р 53429-2009;

- сформулирована математическая модель измерительного канала с пересчетом

цифрового кода АЦП в значение мощности в дБм и оценкой расширенной неопределенности измерения;

- разработано программное обеспечение для ПЛИС на языке Verilog HDL, включающее блоки управления АЦП, усреднения и фильтрации, калибровки и пересчета в дБм, циклического буфера регистрации данных в ОЗУ ПЛИС, контроллера ЖК-индикатора, опроса кнопок и звуковой индикации;

- выполнено функциональное моделирование цифровых блоков в среде Active-HDL с заданием тестовых векторов и критериев приемки; покрытие состояний и переходов конечного автомата управления АЦП составило 100 %, счетчик ошибок по результатам прогона тестов равен нулю;

- разработана методика экспериментальной проверки прибора на лабораторном стенде с использованием калиброванного генератора, аттенуаторов и эталонного измерителя мощности.

Разработан проект измерительного модуля, требующий изготовления опытного образца, калибровки и экспериментальной проверки метрологических характеристик в соответствии с методикой, представленной в работе.

#### **Список литературы**

1. Власов А. И., Расюк А. А., Хохлунова О. Д. Системный проект ПЛИС с использованием визуальных языков // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2022. № 3. С. 18–23. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-18-23.
2. Сухачев К. И., Воронов К. Е., Дорофеев А. С., Шестаков Д. А., Артюшин А. А. Разработка высокопроизводительной вычислительной системы на базе IP-ядра для космической научной аппаратуры // Научное приборостроение. 2022. Т. 32. № 4. С. 88–106. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-vysokoproizvoditelnoy-vychislitelnoy-sistemy-nabaze-ip-yadra-dlya-kosmicheskoy-nauchnoy-apparatury> (дата обращения: 12.01.2026).
3. Смирнов А. В., Власов Е. Е., Пистун Е. Н. Анализ перспективы применения платформы ПЛИС для реализации алгоритмов машинного обучения с целью высокоскоростной обработки информации из видеопотока // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2024. № 1. С. 137–143. URL: [https://vestnik-rosnou.ru/sites/default/files/137\\_%D0%A1C%201%202024\\_0.pdf](https://vestnik-rosnou.ru/sites/default/files/137_%D0%A1C%201%202024_0.pdf) (дата обращения: 24.01.2026). DOI: 10.18137/RNU.V9187.24.01.P.137.
4. Intel Corp. MAX 10 FPGA Device Datasheet. M10-DATASHEET. 2021. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683794/current/datasheet-archives.html> (дата обращения: 14.03.2026).
5. Ксенофонтов С. Ю., Купаев А. В., Василенкова Т. В., Терпелов Д. А., Шилягин П. А., Моисеев А. А., Геликонов Г. В. Высокопроизводительный модуль сбора данных и управления широкополосным спектрометром ближнего инфракрасного диапазона на основе интерфейса USB 3.0 // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 5. С. 131–137. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?a=Pribory2104022Ksenofontov&j=pribory&n=5&v=0&y=2021> (дата обращения: 05.02.2026). DOI: 10.31857/S0032816221040224.

6. Подстригаев А. С. Методика проектирования сверхширокополосного цифрового приемника с субдискретизацией // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 10. С. 11–17. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-11-17.
7. Подстригаев А. С., Смоляков А. В. Экспериментальное исследование точности определения частотно-временных параметров импульса в цифровом приемнике с субдискретизацией при многосигнальном воздействии // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: 10.34759/trd-2022-123-15.
8. Intel Corp. EP5388QI 800 mA PowerSoC Step-Down Converter Datasheet. 2018. URL: [https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en\\_US/pdfs/literature/ds/ep5388qi-datasheet.pdf](https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/ds/ep5388qi-datasheet.pdf) (дата обращения: 14.03.2026).
9. Microchip Technology Inc. MCP1525/41 – 2.5V and 4.096V Voltage References. DS21653D. 2010. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21653D.pdf> (дата обращения: 14.03.2026).
10. Григорьев А. В., Юрков Н. К., Ескибаев Е. Т., Избасов А. Г., Байсеитов М. Н. Исследование целостности сигнала и электрических параметров в сложных измерительных системах // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 11–21. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-2-2.
11. Ципина Н. В., Хорошайлов Р. Н., Турецкий И. А. Оптимизация теплового режима узла на печатной плате с использованием байесовского подхода // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 6. С. 78–86. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.6.010.
12. Селиванов К. В., Долотов И. И., Домников А. С. Выбор конструкционных материалов и приемов для эффективного отвода тепла от печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2023. № 1. С. 3–11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54324481> (дата обращения: 02.02.2026).
13. Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009. 880 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Electromagnetic+Compatibility+Engineering-p-9780470189306> (дата обращения: 14.03.2026). ISBN 978-0-470-18930-6.
14. Analog Devices. AD8307 Low Cost DC-500 MHz, 92 dB Logarithmic Amplifier. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8307.pdf> (дата обращения: 21.03.2026).
15. Шитенков М. О., Дементьев Д. В., Леонтьев В. В., Шереметьев А. Д., Мурын Ю. А. Радиационные испытания концентратора данных на базе программируемой логической схемы Artix-7 для кремниевой трековой системы эксперимента VM@N // Приборы и техника эксперимента. 2024. № 4. С. 79–88. URL: <https://www.iet.ras.ru/2024/4/pub/4.pdf> (дата обращения: 14.03.2026). DOI: 10.31857/S0032816224040094. EDN: NYSXKP.
16. Mini-Circuits. BPF-V300+ Surface Mount Bandpass Filter Datasheet. 2020. URL: <https://www.minicircuits.com/pdfs/BPF-V300+.pdf> (дата обращения: 14.03.2026).
17. Бахтин А. А., Волков А. С., Солодков А. В., Свиридов И. А. Система распознавания модуляции сигналов на основе нейронной сети с использованием ПЛИС // Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: 10.34759/trd-2021-121-13.
18. Смоляков А. В., Подстригаев А. С. Характеристики обнаружения цифрового приемника с субдискретизацией // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 9. С. 95–107. DOI: 10.18127/j00338486-202109-09.
19. Щербаков Е. В. Основные методы измерения мощности высокочастотного сигнала // Молодой ученый. 2021. № 25 (367). С. 35–40. URL: <https://moluch.ru/archive/367/82586> (дата обращения: 06.03.2026).
20. Брысин А. Н., Арсентьев Д. Р., Новикова А. С., Журавлева Ю. А., Железникова О. Е., Коваленко О. Ю. Разработка и программно-аппаратная реализация двоянного 14-разрядного АЦП // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2024. № 2 (66). С. 84–93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-programmno-apparatnaya-realizatsiya-sdvoennogo-14-razryadnogo-atsp> (дата обращения: 17.03.2026).
21. Макеев П. А., Чермошенцев С. Ф. Апробация методики автоматизированного размещения элементов на гибко-жесткой печатной плате на практических примерах // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178481> (дата обращения: 28.03.2026).
22. Уайтт К., Рентюк В. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС // Компоненты и технологии. 2019. № 6 (215). С. 121–128. URL: <https://www.emc-e.ru/topologija-pechatnyh-plat/osobennosti-konstruirovaniya-pcb/> (дата обращения: 06.03.2026).
23. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ, 2010. 12 с.
24. IPC-2221B. Generic Standard on Printed Board Design. Bannockburn, IL: IPC, 2012. 130 p. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/ipc/ipc2221b2012> (дата обращения: 14.03.2026).

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.



## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ ЛОПАСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ МАШИНЫ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

Шаповалова С. В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Российская Федерация, e-mail: shapovalovas@bk.ru*

В статье представлена сравнительная расчетная оценка четырех вариантов лопастных элементов специализированного колесного движителя машины повышенной проходимости, предназначенной для преодоления водных преград без установки отдельного гребного винта. Целью исследования является обоснование рационального варианта лопастного элемента специализированного колесного движителя машины повышенной проходимости на основе сравнительной расчетной модели, учитывающей работу движителя на воде и сопутствующие ограничения при движении по суше. Рассмотрены серповидная, складная серповидная, V-образная секционная и ковшовая лопасти с окнами. Для всех вариантов разработаны пространственные 3D-модели, после чего выполнено сопоставление в одинаковых расчетных условиях. В качестве основных показателей использованы расчетная скорость движения в стоячей воде и на течении, тяговое усилие, коэффициент гидродинамической эффективности, курсовая устойчивость, сопротивление на суше, ударные нагрузки, технологичность изготовления и надежность. Интегральный показатель универсальности дополнен обоснованием весовых коэффициентов, процедурой нормирования баллов и анализом чувствительности. Установлено, что ковшовая лопасть обеспечивает наибольшее тяговое усилие, V-образная лопасть обладает наилучшей курсовой устойчивостью, а серповидная жесткая лопасть является наиболее простой по изготовлению. В рамках принятой расчетно-оценочной модели наибольший интегральный балл получила складная серповидная лопасть. Полученные данные могут быть использованы как основа для последующего проектирования опытного образца.

**Ключевые слова:** машина повышенной проходимости, колесный движитель, лопасть, водная преграда, сравнительная оценка, 3D-модель

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF PADDLE-BLADE VARIANTS FOR A SPECIALIZED WHEELED PROPULSOR OF A HIGH-MOBILITY VEHICLE

Shapovalova S. V.

*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Industrial University of Tyumen", Tyumen, Russian Federation, e-mail: shapovalovas@bk.ru*

This article presents a comparative calculated assessment of four blade element variants for a specialized wheeled propulsion unit for an all-terrain vehicle designed to overcome water obstacles without installing a separate propeller. The objective of the study is to substantiate a rational blade element variant for a specialized wheeled propulsion unit for an all-terrain vehicle based on a comparative calculation model that takes into account the propulsion unit's operation on water and the associated limitations when moving on land. The following blades are considered: sickle-shaped, folding sickle-shaped, V-shaped sectional, and bucket-type with windows. Three-dimensional 3D models were developed for all variants, after which they were compared under identical design conditions. The main performance indicators used include estimated speed in still and current water, traction force, hydrodynamic efficiency coefficient, directional stability, resistance on land, impact loads, manufacturability, and reliability. To summarize the results, an integrated versatility index is proposed; its weights, score normalization procedure, and sensitivity to changes in weighting factors are explained. It was found that the bucket design provides the highest traction force, the V-shaped design has the best directional stability, and the sickle-shaped rigid blade is the simplest to manufacture. Within the adopted calculation-and-evaluation model, the folding sickle-shaped blade received the highest integrated score. These findings can be used as a basis for the subsequent design of a prototype.

**Keywords:** high-mobility vehicle, wheeled propulsor, blade, water obstacle, comparative assessment, 3D model

### Введение

Создание транспортно-технологических машин повышенной проходимости, способных эффективно перемещаться как по суше, так и по водной поверхности, остается одной из наиболее сложных задач современной транспортной и робототехнической инженерии. Анализ опубликован-

ных работ показывает, что объединение наземного и водного способов движения в одном движителе позволяет упростить компоновку, однако почти всегда сопровождается противоречием между тяговыми свойствами на суше и гидродинамической эффективностью на воде [1–3]. Особое значение этот вопрос приобретает для машин,

ориентированных на преодоление озер, заболоченных участков, пойменных зон, мелководья и участков с неустойчивой опорной поверхностью.

В известных решениях для обеспечения водоходности применяются гребные винты, водометы, трансформируемые колеса, гибридные колесно-лопастные схемы и комбинированные движители [4–6]. Вместе с тем установка отдельного гребного органа усложняет конструкцию, увеличивает массу, снижает ремонтпригодность и требует дополнительных приводов [7–9]. Поэтому практический интерес представляет путь, при котором одно и то же колесо используется и как наземный движитель, и как источник тяги на воде за счет внешних лопастных или лопастеподобных элементов [10–12].

В рамках предшествующей конструкторской проработки была предложена модульная схема гребенных секций, устанавливаемых на колесо машины повышенной проходимости. Продолжая эту идею, в настоящей статье рассмотрены уже не один, а четыре варианта рабочих лопастных элементов, отличающихся формой, жесткостью и принципом взаимодействия с потоком воды. В отличие от базовой схемы, где основное внимание было сосредоточено на общей конструкции, здесь выполнено расширенное сравнительное сопоставление вариантов с визуализацией, эскизной проработкой и построением индивидуальных графиков по каждому варианту.

**Цель исследования** – обосновать рациональный вариант лопастного элемента специализированного колесного движителя машины повышенной проходимости на основе сравнительной расчетной модели, учитывающей работу движителя на воде и сопутствующие ограничения при движении по суше.

#### Материалы и методы исследования

В качестве базовой геометрии для сравнительного сопоставления принят колесный движитель наружным диаметром 1300 мм. Для всех вариантов сохранены одинаковые габаритные ограничения по рабочему выступанию лопасти, посадочным зонам и шагу размещения секций на ободе. На первом этапе были сформированы четыре варианта рабочих органов: 1) серповидная жесткая лопасть; 2) складная серповидная лопасть; 3) V-образная секционная лопасть; 4) ковшовая лопасть с разгрузочными окнами. Для каждого варианта подготовлены пространственная 3D-визуализация, что позволило сопоставить не только функциональные, но и технологические особенности конструкции.

Сравнение вариантов выполнено в одинаковых режимах частоты вращения колеса: 20, 40, 60, 80 и 100 об/мин. Для водной среды рассматривались два характерных случая: движение по озеру без течения и движение по реке при наличии встречного течения. В качестве первичных показателей принимались расчетная скорость на воде, тяговое усилие и коэффициент гидродинамической эффективности. Дополнительно использовались интегральные конструкторско-эксплуатационные показатели: курсовая устойчивость, сопротивление на суше, ударные нагрузки, технологичность изготовления и надежность.

Поскольку на данной стадии работы выполнялась расчетная, а не натурная программа испытаний, численные значения следует рассматривать как сопоставимую инженерную модель. Ее задача заключается в том, чтобы при одинаковых исходных допущениях показать тенденции изменения показателей и предварительно ранжировать варианты для дальнейшей детализации. Такой подход согласуется с практикой ранних этапов проектирования, когда цифровая модель используется как инструмент выбора конструкции до изготовления опытного образца [13–15].

Для обобщения результатов использован интегральный показатель универсальности  $U$ , учитывающий как работу на воде, так и ограничения при движении по суше:

$$U = 0,25T + 0,15V + 0,15S + 0,15(10 - R) + 0,10(10 - I) + 0,10M + 0,10N, \quad (*)$$

где  $T$  – тяга на воде,  $V$  – скоростной потенциал на воде,  $S$  – курсовая устойчивость,  $R$  – сопротивление на суше,  $I$  – ударные нагрузки,  $M$  – технологичность изготовления,  $N$  – надежность конструкции. Для штрафных показателей  $R$  и  $I$  меньшее значение считалось более предпочтительным, поэтому в формуле они учитывались как  $(10 - R)$  и  $(10 - I)$ .

Весовые коэффициенты в формуле (\*) приняты как экспертные проектные приоритеты ранней стадии разработки. Их сумма равна единице. На показатели, непосредственно определяющие движение на воде, отнесено 0,55 интегрального веса: тяга  $T$  получила наибольший вес 0,25, поскольку именно она определяет способность движителя формировать полезную силу на воде; скорость  $V$  и курсовая устойчивость  $S$  получили по 0,15. Ограничения при движении по суше и ударные воздействия учитываются суммарным весом 0,25, так как они влияют на универсальность движителя, износ и допустимость применения лопастей на твердой опорной поверхности.

**Таблица 1**

Правила нормирования показателей при переводе в шкалу 0–10

Показатель	Правило нормирования	Пояснение
T	$T = \min(10; 10F/F_{оп})$	F – максимальное тяговое усилие; $F_{оп} = 2,40$ кН
V	$V = \min(10; 10(0,6v_{воз} + 0,4v_{ррек})/v_{оп})$	v <sub>воз</sub> и v <sub>ррек</sub> – расчетные скорости на озере и реке; v <sub>оп</sub> = 6,80 км/ч
S	Экспертная оценка 0–10	Учитываются симметрия гребка, боковой срыв, устойчивость курса
R	$R = \min(10; 10R_f/R_{оп})$	Штрафной балл сопротивления на суше; в U входит как (10 – R)
I	$I = \min(10; 10I_f/I_{оп})$	Штрафной балл ударных нагрузок; в U входит как (10 – I)
M	Экспертная оценка 0–10	Учитываются простота формы, число деталей, сборка, ремонт
N	Экспертная оценка 0–10	Учитываются подвижные соединения, загрязнение, концентрация нагрузок, ремонтпригодность

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

**Таблица 2**

Исходные условия расчетно-оценочного эксперимента

Параметр	Значение
Диаметр колеса	1300 мм
Частота вращения, n	20; 40; 60; 80; 100 об/мин
Режим 1	Движение по озеру без течения
Режим 2	Движение по реке при наличии течения
Первичные показатели	Скорость, тяга, гидродинамическая эффективность
Дополнительные показатели	Курсовая устойчивость, сопротивление на суше, ударные нагрузки, технологичность, надежность

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Технологичность M и надежность N включены с весами по 0,10, поскольку на расчетной стадии они не являются основными гидродинамическими показателями, но определяют реализуемость выбранной схемы.

Нормирование частных показателей выполнялось по шкале 0–10 (табл. 1, 2). Для показателей типа «больше – лучше» использовалось отношение расчетного значения к опорному значению данного класса движителей с ограничением сверху 10 баллами. Для штрафных показателей типа «меньше – лучше» сначала определялся штрафной балл по той же шкале, после чего в интегральный показатель включалась величина (10 – R) или (10 – I). Показатели S, M и N являются экспертно-нормированными: S учитывает симметрию взаимодействия с потоком и склонность к боковому срыву; M – число деталей, про-

стоту изготовления и сборки; N – наличие подвижных соединений, чувствительность к загрязнению, концентрацию нагрузок и ремонтпригодность.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1–8 приведены подготовленные для статьи визуализации и индивидуальные графики по каждому варианту лопасти. В каждом случае 3D-модель используется как средство конструктивного анализа, а графики – как средство сопоставления динамики расчетных показателей при изменении частоты вращения. Ниже рассмотрены особенности каждого варианта.

#### Серповидная лопасть

Серповидная лопасть рассматривается как наиболее простая по конструкции базовая схема. Жесткая рабочая поверхность

обеспечивает достаточно плавный вход в воду и умеренную величину гидродинамического сопротивления. Согласно расчетной модели максимальная скорость движения по озеру для данного варианта составляет 6,1 км/ч, по реке – 4,7 км/ч, а максимальное тяговое усилие достигает 2,02 кН. Коэффициент гидродинамической эффективности достигает пика 63%

при 60 об/мин, после чего наблюдается его снижение, что указывает на рост динамических потерь при увеличении частоты вращения. По интегральной оценке данный вариант получил 7,39 балла и может рассматриваться как рациональное решение в случаях, когда ключевым ограничением являются простота изготовления и ремонтпригодность.

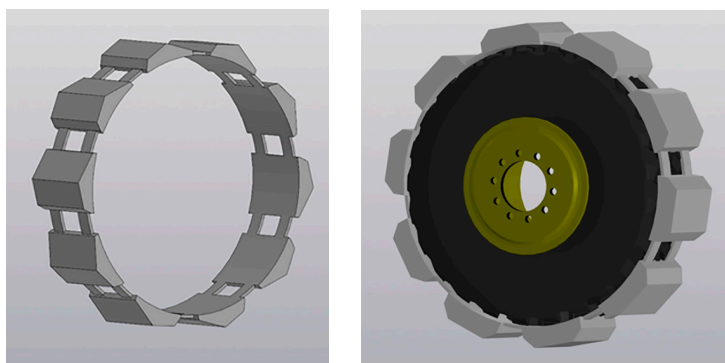


Рис. 1. Серповидная лопасть: 3D-модель

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

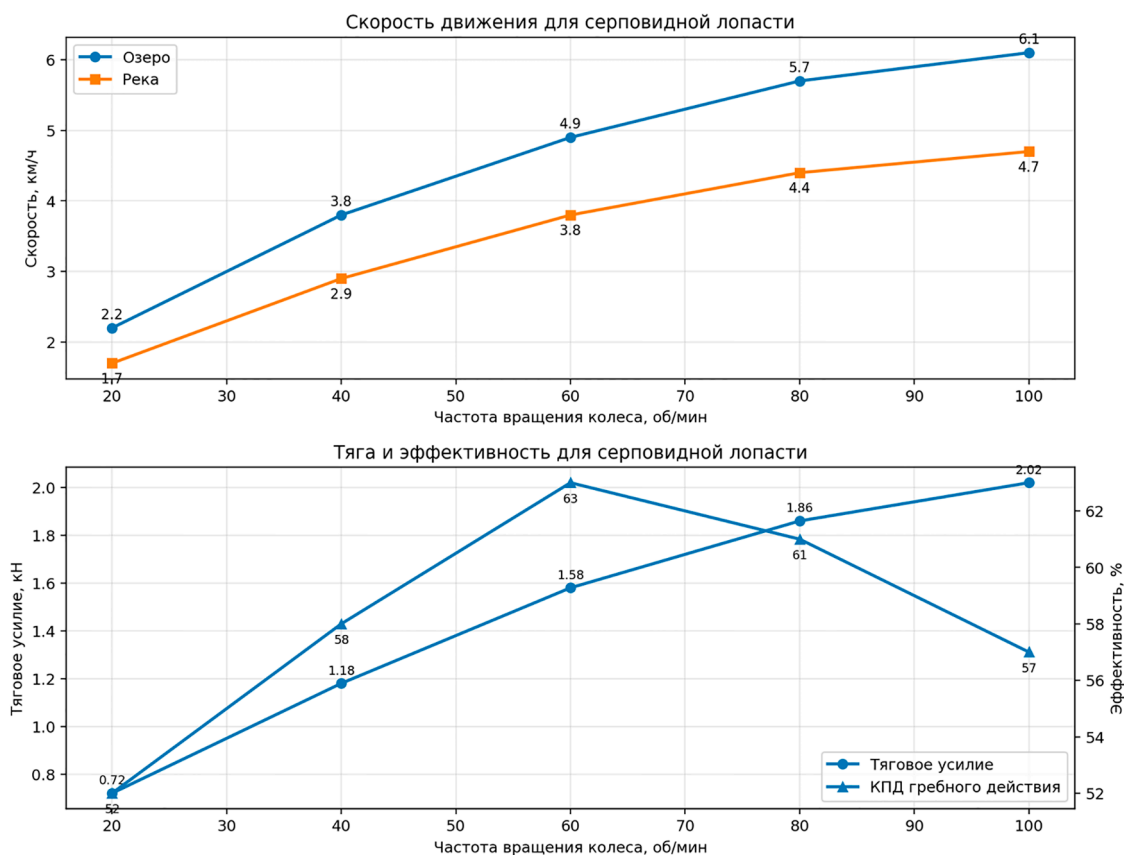


Рис. 2. Индивидуальные расчетные графики для варианта «Серповидная лопасть»

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

*Складная серповидная лопасть*

Складная серповидная лопасть отличается наличием подвижного рабочего элемента, что позволяет уменьшать паразитное сопротивление вне активной фазы гребка. Именно эта схема показала наилучший общий баланс характеристик в рамках принятой расчетно-оценочной модели. Максимальная скорость по озеру составила 6,6 км/ч, по реке – 5,1 км/ч,

максимальное тяговое усилие – 2,18 кН. Наиболее высокий коэффициент эффективности составил 68% при 60 об/мин. Дополнительным преимуществом стала лучшая оценка по критерию универсальности: 7,83 балла. Ограничивающим фактором данной схемы являются повышенные требования к шарнирному соединению, защите от загрязнения и контролю эксплуатационных зазоров.

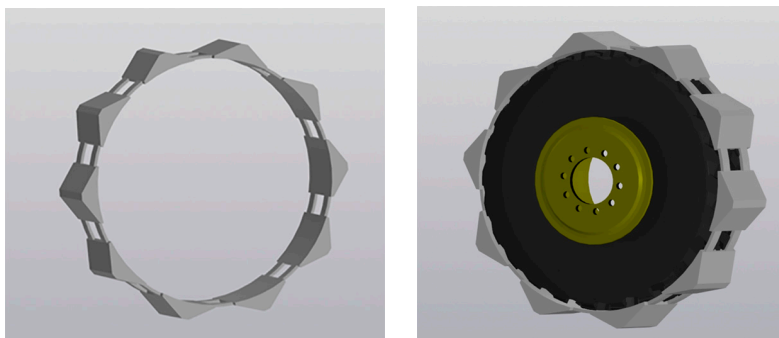


Рис. 3. Складная серповидная лопасть: 3D-модель  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

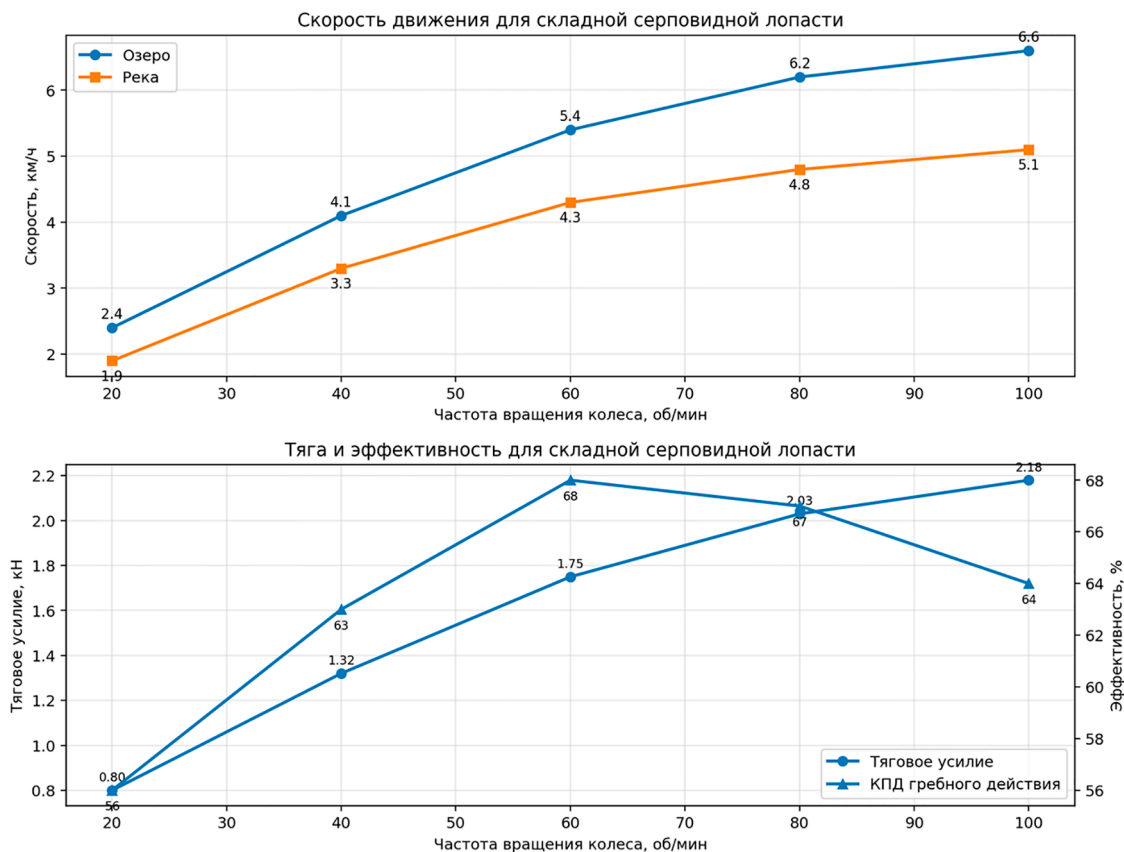


Рис. 4. Индивидуальные расчетные графики для варианта «Складная серповидная лопасть»  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

### *V-образная секционная лопасть*

*V*-образная секционная лопасть образует рабочую поверхность из двух наклонных половин, благодаря чему поток воды направляется более упорядоченно, а боковой срыв уменьшается. По расчетным данным максимальная скорость по озеру достигает 5,5 км/ч, по реке – 4,7 км/ч, тяговое усилие – 1,84 кН. Максимальная эффективность на-

блюдается при 60 об/мин и составляет 60 %. Хотя данный вариант уступает серповидным схемам по абсолютной тяге и скорости на озере, он демонстрирует наиболее высокую курсовую устойчивость и потому является перспективным для машин, для которых важны управляемость и стабильность движения на воде. Интегральный показатель составил 7,38 балла.

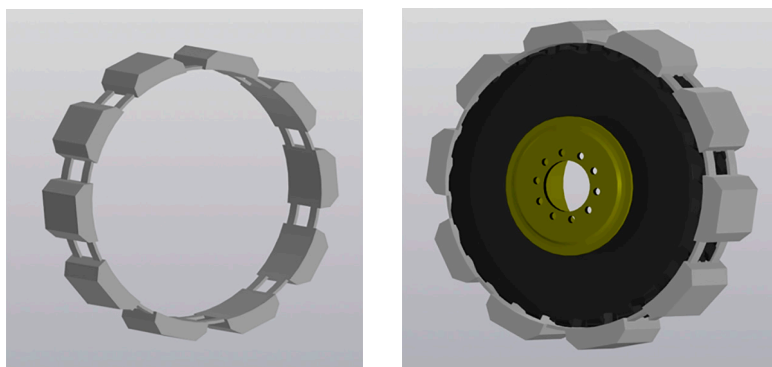


Рис. 5. *V*-образная секционная лопасть: 3D-модель и 2D-эскиз  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

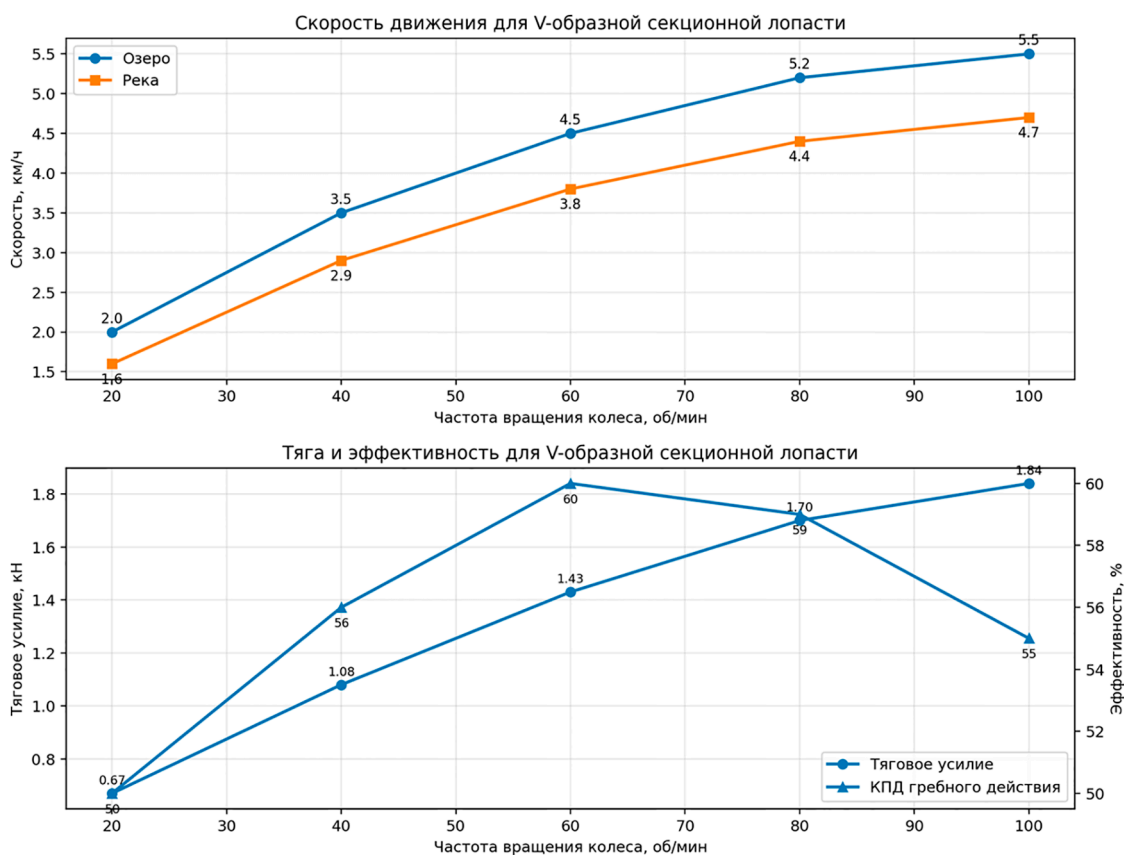
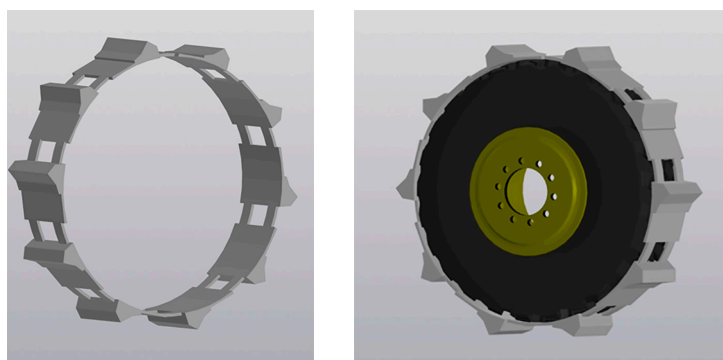


Рис. 6. Индивидуальные расчетные графики для варианта «*V*-образная секционная лопасть»  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

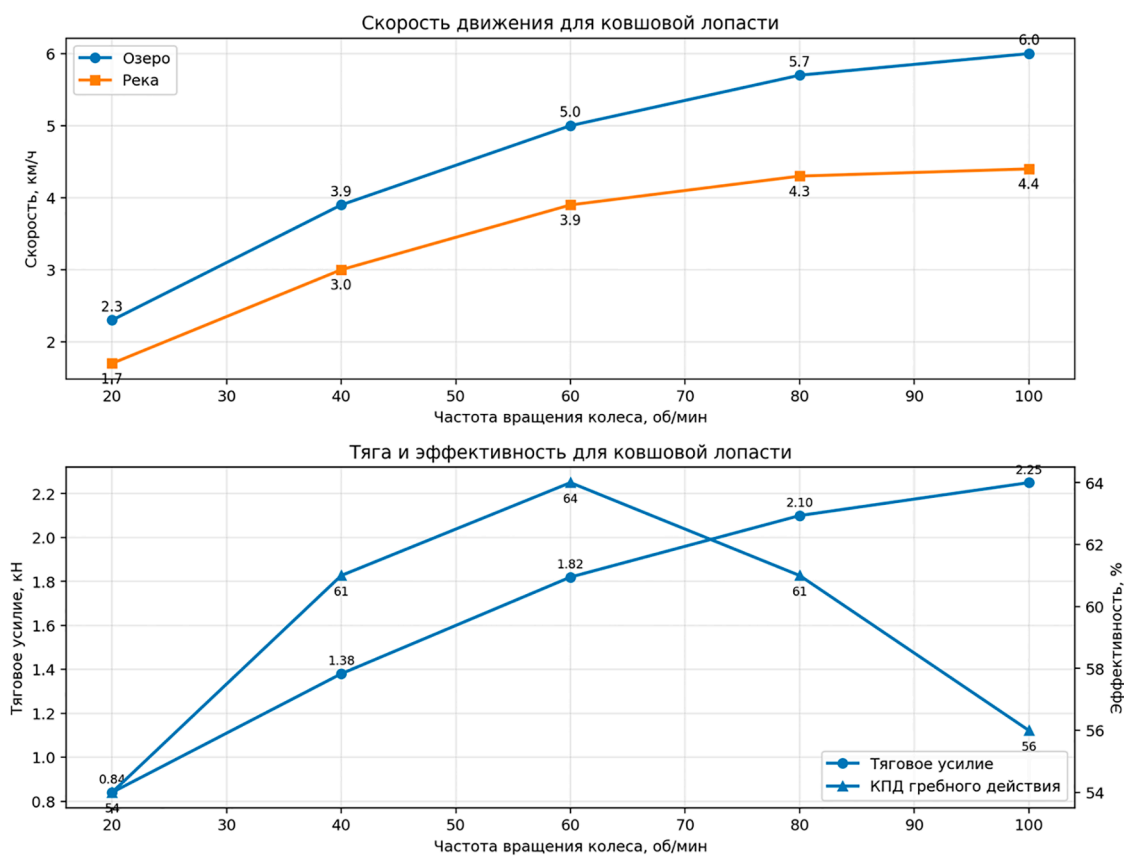
*Ковшовая лопасть с окнами*

Ковшовая лопасть с окнами ориентирована на максимальный захват и отбрасывание водной массы. В результате именно этот вариант показал наибольшее тяговое усилие – 2,25 кН при 100 об/мин. Скорость движения по озеру достигает 6,0 км/ч, по реке – 4,4 км/ч, а максимальная эффективность составляет 64 % при 60 об/мин.

Вместе с тем увеличение рабочей площади вызывает рост сопротивления при движении по суше и повышение ударных нагрузок, что снижает интегральный показатель до 6,95 балла. Такой вариант целесообразен в ситуациях, когда приоритетом является именно тяга на воде, а требования к движению по твердому покрытию являются вторичными.



*Рис. 7. Ковшовая лопасть с окнами: 3D-модель и 2D-эскиз  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования*



*Рис. 8. Индивидуальные расчетные графики для варианта «Ковшовая лопасть с окнами»  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования*

### Сводное сравнение вариантов

Для завершающего сопоставления вариантов использованы интегральные оценки и частные балльные показатели, приведенные в табл. 3. Из данных видно, что лидерство конкретного варианта определяется выбранным критерием: ковшовая схема обеспечивает максимум тяги, V-образная – лучшую устойчивость, серповидная жесткая – наибольшую технологичность среди жестких лопастей, а складная серповидная – наилучшее сочетание скоростных, тяговых и эксплуатационных свойств.

Анализ чувствительности (табл. 4) показывает, что при изменении проектных приоритетов складная серповидная лопасть сохраняет первое место. Следовательно, вывод о ее наибольшем интегральном балле не является следствием единственного случайно выбранного набора весовых коэффициентов. Наибольшая чувствительность наблюдается у ковшовой схемы: при повышении веса тягово-скоростных характеристик ее оценка возрастает, а при усилении штрафов за сопротивление на суше и ударные нагрузки – снижается (рис. 9).

### Таблица 3

Сравнительная оценка вариантов лопастей по основным критериям

Вариант	T	V	S	R	I	M	N	U
Серповидная	8,4	8,1	7,6	4,8	4,2	7,5	8,2	7,39
Складная серповидная	9,1	8,8	8,4	3,2	2,8	5,8	6,5	7,83
V-образная секционная	7,7	7,6	9,1	4,0	3,9	6,6	7,8	7,38
Ковшовая с окнами	9,4	7,9	7,0	6,4	6,1	7,0	7,3	6,95

Примечание: R и I являются штрафными показателями; чем ниже их балл, тем лучше. Значения U рассчитаны по формуле (\*) с учетом показателя N.

Составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

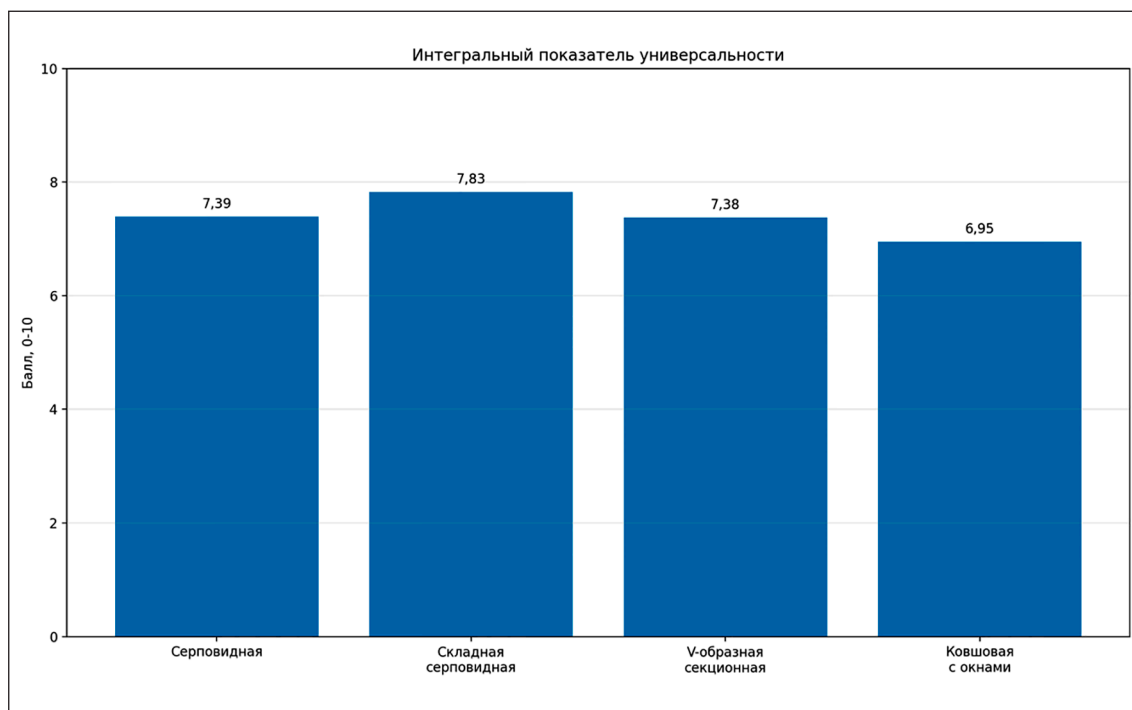


Рис. 9. Интегральный показатель универсальности по вариантам лопастей после уточнения нормирования и показателя надежности N

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Таблица 4

Анализ чувствительности интегрального показателя U к изменению весовых коэффициентов

Параметр	Серповидная	Складная серповидная	V-образная секционная	Ковшовая с окнами
Базовый вариант	7,39	7,83	7,38	6,95
Приоритет воды	7,54	8,01	7,50	7,24
Приоритет суши и ударных нагрузок	7,16	7,67	7,24	6,54
Приоритет надежности и технологичности	7,42	7,65	7,36	6,94

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

### Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что для специализированного колесного двигателя не существует единственной формы лопасти, одинаково оптимальной по всем критериям. Увеличение активной площади, как правило, приводит к росту тягового усилия на воде, однако одновременно вызывает увеличение сопротивления на суше и рост ударных нагрузок. Именно поэтому ковшовая схема, лидируя по тяге, уступает складной серповидной лопасти по интегральному показателю. Аналогичная логика прослеживается и для V-образной схемы: выигрыш по устойчивости достигается ценой некоторого снижения скорости и тяги.

В рамках принятой расчетно-оценочной модели наибольший интегральный балл получила складная серповидная лопасть. Она сочетает высокую тягу, наилучшую скорость в обоих водных режимах и приемлемые значения штрафных показателей на суше. При этом жесткая серповидная лопасть может быть рекомендована в качестве упрощенной и более технологичной альтернативы, если проект ставит во главу угла ремонтпригодность, низкую стоимость и минимальную сложность изготовления. V-образная схема целесообразна в конструкциях, где критична устойчивость курса, например при работе на течении, а ковшовая – в машинах, для которых кратковременное увеличение тяги важнее универсальности.

Следует подчеркнуть, что представленные зависимости получены в рамках единой расчетно-оценочной модели. Они не заменяют полноценных натурных испытаний, а выступают как предварительный инструмент ранжирования конструкций. Тем не менее такой подход позволяет еще на стадии проектирования определить приоритетный путь дальнейшей детализации, сократить

количество заведомо неэффективных решений и обосновать выбор варианта для изготовления опытного образца.

### Валидация расчетной модели и сопоставление с данными литературы

Поскольку в настоящей работе исследование выполнено на расчетно-оценочном уровне, валидация результатов проведена путем сопоставления выявленных тенденций с опубликованными данными по аналогичным колесно-лопастным и трансформируемым двигателям амфибийного типа (табл. 5). Прямое сравнение абсолютных значений скорости и тягового усилия является ограниченным, так как в литературных источниках рассматриваются конструкции другого масштаба, массы, диаметра двигателя, числа лопастей, частоты вращения и условий испытаний. Поэтому валидация выполнялась не по полному совпадению численных значений, а по проверке инженерных тенденций: влияния формы лопасти на тягу, сопротивление, устойчивость движения и универсальность применения в режимах «суша – вода».

В работе С. Kim и соавт. исследован колесно-лопастной двигатель типа angled spoke paddling wheel с самоповорачивающимися лопастями. Экспериментальная оптимизация показала, что геометрия и угол установки лопасти существенно влияют на тяговое усилие при движении на воде. Это подтверждает корректность принятого в настоящей статье подхода, при котором форма рабочего элемента рассматривается как один из основных факторов, определяющих тяговые свойства двигателя.

Полученные результаты также согласуются с работами X. Xie и соавт, Z. Wang и соавт., Y. Ge, F. Gao и W. Chen, где рассматриваются трансформируемые колесные, wheel-spoke-paddle и мультимодальные схемы амфибийных двигателей.

Сопоставление результатов расчетной модели с данными литературы по аналогичным колесно-лопастным схемам

Источник	Основные выводы	Соответствие исследованию
Kim et al.	Форма, угол установки и режим вращения лопасти заметно влияют на создаваемую тягу колесно-лопастного движителя	Подтверждает необходимость сравнения нескольких геометрических вариантов лопастей по тяге, скорости и эффективности
Xie et al.	Трансформируемое колесо амфибийного вездехода должно работать в разных состояниях в зависимости от условий движения	Согласуется с использованием интегрального критерия U, объединяющего водные показатели и ограничения движения по суше
Wang et al.	Мультимодальное трансформируемое колесо рассматривается как способ совмещения наземного и водного режимов без отдельного гребного органа	Подтверждает актуальность специализированных лопастных элементов, устанавливаемых на колесный движитель
Ge et al.	Wheel-spoke-paddle схема обеспечивает движение по суше, воде и переходным участкам, но требует компромисса между режимами	Соответствует выводу о преимуществе складной серповидной лопасти как компромиссного варианта по критерию «суша – вода»
Guan et al.	Интегрированные wheel-leg-paddle конструкции применяются для амфибийных роботов и подтверждают перспективность объединенных движителей	Подтверждает общий выбор направления исследования, связанного с совмещением колесного и лопастного принципов движения

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

В этих исследованиях подчеркивается, что универсальный движитель должен обеспечивать приемлемое движение не только в воде, но и на суше, поэтому повышение водной тяги не может рассматриваться отдельно от сопротивления, ударных нагрузок, надежности и технологичности конструкции.

Сопоставление показывает, что выявленные в расчетно-оценочной модели зависимости имеют инженерное подтверждение в опубликованных работах. Увеличение активной площади лопасти действительно способствует росту тяги на воде, однако одновременно может увеличивать сопротивление и ударные нагрузки при движении по суше. Трансформируемые и складные схемы позволяют уменьшить данное противоречие, что объясняет получение наибольшего интегрального балла складной серповидной лопастью в рамках принятой расчетно-оценочной модели.

Вместе с тем выполненная валидация является предварительной. Для окончательного подтверждения расчетных результатов необходимы CFD-моделирование обтекания лопастей, стендовые испытания колесного движителя в водной среде и последующая проверка опытного образца при движении по озеру и по реке при наличии течения.

### Список литературы

1. Baines R., Fish F. E., Kramer-Bottiglio R. Amphibious Robotic Propulsive Mechanisms: Current Technologies and Open Challenges // *Bioinspired Sensing, Actuation, and Control in Underwater Soft Robotic Systems*. 2021. P. 41–69. DOI: 10.1007/978-3-030-50476-2\_3.
2. Xie X., Gao F., Huang C., Zeng W. Design and development of a new transformable wheel used in amphibious all-terrain vehicles (A-ATV) // *Journal of Terramechanics*. 2017. Vol. 69. P. 45–61. DOI: 10.1016/j.jterra.2016.11.001.
3. Kim C., Han S., Won J., Seo T. Empirical optimization of an angled spoke paddling wheel with self-rotating mechanism // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Art. 20511. DOI: 10.1038/s41598-022-25181-7.
4. Zhou F., Xu X., Xu H., Chang Y., Wang Q., Chen J. Implementation of a Reconfigurable Robot to Achieve Multimodal Locomotion Based on Three Rules of Configuration // *Robotica*. 2020. Vol. 38. Is. 8. P. 1478–1494. DOI: 10.1017/S0263574719001589.
5. Liu B., Xu X., Pan D. Influence of resistance due to locomotion mechanism configurations of a new high-speed amphibious vehicle (HSAV-II) // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 283. Art. 115175. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115175.
6. Pan D., Xu X., Liu B., Xu H., Wang X. A review on drag reduction technology: Focusing on amphibious vehicles // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. Art. 114618. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114618.
7. Xu X., Liu B., Pan D., Xu H. Influence of towing position on hydrodynamic characteristics of an Amphibious Tractor // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. Art. 113932. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113932.
8. Yan Z., Li M., Du Z., Yang X., Luo Y., Chen X., Han B. Study on a tracked amphibious robot bionic fairing for drag re-

duction // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 267. Art. 113223. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113223.

9. Md-Tahir H., Zhang J., Zhou Y., Sultan M., Ahmad F., Du J., Ullah A., Hussain Z., Xia J. Engineering Design, Kinematic and Dynamic Analysis of High Lugs Rigid Driving Wheel, a Traction Device for Conventional Agricultural Wheeled Tractors // *Agriculture*. 2023. Vol. 13. Is. 2. Art. 493. DOI: 10.3390/agriculture13020493.

10. Wang Z., Luo B., Cui W., Li W. Design of multimodal transformable wheels for amphibious robotic vehicles // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024. Vol. 379. Art. 115952. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115952.

11. Ge Y., Gao F., Chen W. A transformable wheel-spoke-paddle hybrid amphibious robot // *Robotica*. 2024. Vol. 42. P. 701–727. DOI: 10.1017/S0263574723001716.

12. Policarpo H., Lourenco J. P. B., Anastacio A. M., Parente R., Rego F., Silvestre D., Afonso F., Maia N. M. M.

Conceptual Design of an Unmanned Electrical Amphibious Vehicle for Ocean and Land Surveillance // *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15. Is. 7. Art. 279. DOI: 10.3390/wevj15070279.

13. Xia D., Yan H., Shi Y., Wu J., Luo X. Development of a novel amphibious robot with a reusable cycloidal propulsion module // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 312. Part 1. Art. 119129. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119129.

14. Xia M., Zhu Q., Yin Q., Lu Z., Zhu Y., Luo Z. Hydrodynamic Simulation and Experiment of a Self-Adaptive Amphibious Robot Driven by Tracks and Bionic Fins // *Biomimetics*. 2024. Vol. 9. Is. 10. Art. 580. DOI: 10.3390/biomimetics9100580.

15. Guan M., Zhang L., Cui B., Wang L. Design and Implementation of wheel-leg-paddle Integrated structure amphibious robot // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 710. DOI: 10.1038/s41598-025-30238-4.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.