

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал

Издается с января 2002 года
Периодичность издания –
один раз в два месяца

Учредитель
Белорусский
национальный технический
университет



Science and Technique

International
Scientific and Technical Journal

Published from January 2002
Publication frequency –
bimonthly

Founder
Belarusian
National Technical
University

Vol. 24 / No 5 / 2025

Журнал включен в базы данных:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

The Journal is included in the following databases:
Web of Science (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE,
Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Информатика

Informatics

Лобатый А. А., Холод П. В.

Повышение точности определения параметров
движения объекта на основе априорной
информации 343

**Sangole Mosam, Gade Swati, Patil Dipak,
Risodkar Yogesh, Kumar Akhilesh**

Adaptive Weighted Mean-Median Filtering
for Robust Salt-and-Pepper Noise Removal
Technique
(Санголе Мосам, Гадэ Свати, Патиль Дипак,
Рисодкар Йогеш, Кумар Ахилеш
Адаптивный метод взвешенной фильтрации
для удаления шума типа «соль и перец») 350

Lobaty A. A., Kholod P. V.

Improving the Accuracy of Determining
the Parameters of the Movement of an Object Based
on A Priori Information 343

**Sangole Mosam, Gade Swati, Patil Dipak,
Risodkar Yogesh, Kumar Akhilesh**

Adaptive Weighted Mean-Median Filtering
for Robust Salt-and-Pepper Noise Removal
Technique 350

Машиностроение и машиноведение

Миньков А. Л.

Влияние постсварочной термической обработки
на механические свойства и характер разрушения
сварных соединений стали P91 361

Механика деформируемого твердого тела

Барсуков В. Г., Евсеева Е. А.

Монтажная погрешность определения модуля
продольной упругости однонаправленных
стеклопластиков 373

Приборостроение

**Козерук А. С., Сафонов В. В., Юринок В. И.,
Филонова М. И., Кузнецик В. О.**

Формализация исполнительного механизма
технологического оборудования
для обработки линз с тонким центром 383

Строительство

Немеровец О. В.

Математическое моделирование прохождения
паводка на реконструируемом гидроузле 393

Транспорт

Вавилов П. В.

Обеспечение безопасности дорожного движения
как объект национальной научно-технической
деятельности в XXI в. 402

Экономика промышленности

**Устинович И. В., Калинина О. В.,
Лукашевич Н. С., Алексеева Н. С.**

Формирование инвестиционного потенциала
научно-промышленного комплекса:
от теории роста к направлениям развития 411

Mechanical Engineering and Engineering Science

Minkov A. L.

Influence of Post-Weld Heat Treatment
on Mechanical Properties and Fracture Character
of Welded Joints of Steel Grade P91 361

Deformation in Solid Mechanics

Barsukov V. G., Evseeva E. A.

Installation Error in Determining
the Longitudinal Elasticity Modulus
of Unidirectional Fiberglass 373

Instrumentation Engineering

**Kozeruk A. S., Safonov V. V., Yurinok V. I.,
Filonova M. I., Kuznechik V. O.**

Formalization of the Actuator Mechanism
of the Technological Equipment
for Processing Lenses with a Thin Center 383

Civil and Industrial Engineering

Nemerovets O. V.

Mathematical Modeling of Flood Flow
at a Reconstructed Hydroelectric Complex 393

Transport

Vavilau P. V.

Ensuring Road Safety
as an Object of National Scientific and Technical
Activity in the 21st Century 402

Economy in Industry

**Ustinovich I. V., Kalinina O. V., Lukashevich N. S.,
Alekseeva N. S.**

Formation of the Scientific-Industrial
Complex Investment Potential:
From Growth Theory to Development Directions 411

Главный редактор
Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

- Алексеев Ю. Г.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Леонович С. Н.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Шелег В. К.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь), заместитель главного редактора,
- Белый А. В.** (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
- Бисби Л.** (Эдинбургский университет, Эдинбург, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии),
- Виттманн Ф. Х.** (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Цюрих, Швейцарская Конфедерация),
- Дидерихс У.** (Ростокский университет, Росток, Федеративная Республика Германия),
- Дмитриев С. М.** (Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация),
- Згуровский М. З.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина),
- Кондерс А. Б.** (Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Федеративная Республика Германия),
- Косёр-Казберук М.** (Белостокский технический университет, Белосток, Республика Польша),
- Лю Тингуо** (компания «Гаююань», провинция Хэнань, Китайская Народная Республика),
- Макнами Р. Я.** (Консультационное агентство по вопросам пожарной безопасности, Стокгольм, Королевство Швеция),
- Максаров В. В.** (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
- Нгуен Тху Нга** (Научный энергетический институт, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
- Одиназода Х. О.** (Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан),
- Опяляк М.** (Люблинский технический университет, Люблин, Республика Польша),
- Пенязьков О. Г.** (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Editor-in-Chief
Sergei V. Kharytonchyk

Editorial Board

- Aliakseyeu Yu. G.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Leonovich S. N.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Sheleg V. K.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus), Deputy Editor-in-Chief,
- Byeli A. V.** (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- Bisby L.** (University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland),
- Wittmann F. H.** (ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, Swiss Confederation),
- Diederichs U.** (University of Rostock, Rostock, Federal Republic of Germany),
- Dmitriev S. M.** (Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation),
- Zgurovsky M. Z.** (National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine),
- Koenders A. B.** (Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Federal Republic of Germany),
- Kosior-Kozberuk M.** (Bialystok University of Technology, Bialystok, Republic of Poland),
- Liu Tingguo** (Gaoyuan Company, Henan Province, People’s Republic of China),
- McNamee R. J.** (Brandskyddslaget AB, Stockholm, Kingdom of Sweden),
- Maksarov V. V.** (Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation),
- Nguyen Thu Nga** (Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
- Odinazoda H. O.** (Tajik Technical University named after Academic M. S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan),
- Opielak M.** (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),
- Penyazkov O. G.** (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

Пимьента П. (Научно-технический центр строительной отрасли, Сен-Мартен-д'Эр, Французская Республика),
Родригес Ж. П. К. (Коимбрский университет, Коимбра, Португальская Республика),
Романиук Ф. А. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Сидерис К. (Фракийский университет имени Демокрита, Комотины, Греческая Республика),
Соболев К. (Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, Соединенные Штаты Америки),
Сумров В. В. (компания «Интернет Коммуникаций Девелопмент Групп Лимитед», Рига, Латвийская Республика),
Феличетти Р. (Миланский технический университет, Милан, Итальянская Республика),
Хрусталеv Б. М. (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Чжао Цзи (Северо-Восточный университет, Шэньян, Китайская Народная Республика),
Чижик С. А. (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Ши Ли И (Научно-технологический парк Шанхайского университета, Шанхай, Китайская Народная Республика),
Эберхардштайнер Й. (Венский технический университет, Вена, Австрийская Республика),
Янковский А. (Технологический институт ВВС, Варшава, Республика Польша)

Ответственный секретарь редакционной коллегии
В. Г. Горбаиш

Pimienta P. (Scientific and Technical Centre for the Building – CSTB Department, Saint-Martin-d'Hères, French Republic),
Rodrigues J. P. C. (University of Coimbra, Coimbra, Portuguese Republic),
Romaniuk F. A. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Sideris K. (Democritus University of Thrace, Komotini, Hellenic Republic),
Sobolev K. (University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, United States of America),
Sumrov V. V. (Internet Communication Development Group Ltd – ICD, Riga, Republic of Latvia),
Felicetti R. (Polytechnic University of Milan, Milan, Italian Republic),
Khroustalev B. M. (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
Zhao Ji (Northeastern University, Shenyang, People's Republic of China),
Chizhik S. A. (National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
Shi Li Yi (Science and Technology Park of Shanghai University, Shanghai, People's Republic of China),
Eberhardsteiner J. (Vienna University of Technology, Vienna, Republic of Austria),
Jankowski A. (Air Force Institute of Technology, Warsaw, Republic of Poland)

Executive Secretary of Editorial Board
V. G. Gorbash

Ведущий научный редактор

В. Н. Гурьянчик

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 30.09.2025. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 65 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет, 2025

Lead Science Editor

V. N. Guryanchyk

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Tel. +375 17 320-65-14

E-mail: sat@bntu.by
<http://sat.bntu.by>

УДК 629.7

Повышение точности определения параметров движения объекта на основе априорной информации

Докт. техн. наук, проф. А. А. Лобатый¹⁾, асп. П. В. Холод¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Статья посвящена задаче обоснования различных методов повышения точности определения параметров движения наземного объекта (НО) с помощью аппаратуры, установленной на борту беспилотного летательного аппарата (БЛА), основанных на комплексном использовании информации, поступающей как с бортовых систем видеонаблюдения, так и основанной на рассмотрении априорных стохастических математических моделей движения НО. На основе анализа математических моделей бортовых систем видеонаблюдения обоснован общий вид стохастической математической модели измерителя параметров движения НО. Сделано обоснование стохастической динамической математической модели изменения параметров движения НО, основанной на возможности априорного получения экспериментальных данных о движении НО в типовых условиях с последующей статистической обработкой полученных результатов. Проведено сведение прикладной задачи слежения за НО к ее классической постановке с различными вариантами представления в математической форме. Рассмотрены различные варианты решения задачи оценивания параметров движения НО в зависимости от ее постановки при наличии измерений. Приведены различные полученные аналитически решения данной задачи, основанные на соответствующих обоснованных критериях качества. В соответствии с этими критериями приведены алгоритмы комплексной обработки априорной и апостериорной информации о движении НО. Проведена оценка возможных ошибок оценивания параметров движения НО, вызванных методически неправильной постановкой задачи. Разработана компьютерная модель, на основе которой проведено исследование полученных аналитическими методами алгоритмов обработки на борту БЛА информации о параметрах движения НО. Приведенные графические зависимости наглядно показывают качественные и количественные изменения оцениваемых параметров и возможных ошибок оценивания в различных условиях. Полученные результаты предоставляют исследователям возможность на этапе предварительного проектирования бортовых систем БЛА обосновывать некоторые основные требования к элементам беспилотного авиационного комплекса, выполняющим задачи управления БЛА и формирования оптимальной траектории его полета при сопровождении НО.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, наземный объект, математическая модель, измеритель, процесс, критерий оценивания

Для цитирования: Лобатый, А. А. Повышение точности определения параметров движения объекта на основе априорной информации / А. А. Лобатый, П. В. Холод // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 343–349. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-343-349>

Improving the Accuracy of Determining the Parameters of the Movement of an Object Based on A Priori Information

A. A. Lobaty, P. V. Kholod

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article is dedicated to the problem of substantiating various methods for increasing the accuracy of determining the parameters of ground object (GO) motion using equipment installed on board of an unmanned aerial vehicle (UAV),

Адрес для переписки

Лобатый Александр Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/11,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 346-82-56
lobaty@bntu.by

Address for correspondence

Address for correspondence:
Lobaty Alexander A.
Belarusian National Technical University
65/11, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 346-82-56
lobaty@bntu.by

based on the integrated use of information coming from both on-board video surveillance systems and information based on the consideration of a priori stochastic mathematical models of GO motion. Based on the analysis of mathematical models of on-board video surveillance systems, a general form of the stochastic mathematical model of the GO motion parameter measurer is substantiated. A stochastic dynamic mathematical model of changing GO motion parameters is substantiated, based on the possibility of a priori obtaining experimental data on GO motion under typical conditions with subsequent statistical processing of the obtained results. The applied problem of GO tracking was reduced to its classical formulation with various options for representing it in mathematical form. Various options for solving the problem of estimating GO motion parameters are considered depending on its formulation in the presence of measurements. A number of analytically obtained solutions to this problem are presented, based on the corresponding substantiated quality criteria. In accordance with these criteria, the corresponding algorithms for the complex processing of a priori and a posteriori information on the motion of the GO are presented. An assessment of possible errors in estimating the parameters of the GO motion caused by a methodologically incorrect formulation of the problem has been carried out. A computer model has been developed, on the basis of which a study of the algorithms for processing information on the parameters of the GO motion on board the UAV obtained by analytical methods has been carried out. The given graphical dependencies clearly show the qualitative and quantitative changes in the estimated parameters and possible estimation errors in various conditions. The obtained results provide researchers with the opportunity, at the stage of preliminary design of on-board UAV systems to justify some basic requirements for the elements of the unmanned aircraft complex that perform the tasks of controlling the UAV and forming the optimal trajectory of its flight when tracking the GO.

Keywords: unmanned aerial vehicle, ground object, mathematical model, measuring device, process, evaluation criterion

For citation: Lobaty A. A., Kholod P. V. (2025) Improving the Accuracy of Determining the Parameters of the Movement of an Object Based on A Priori Information. *Science and Technique*. 24 (5), 343–349. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-343-349> (in Russian)

Введение

Среди различных известных задач, решаемых беспилотными летательными аппаратами (БЛА), следует выделить задачу слежения за движущимися наземными объектами (НО) с помощью аппаратуры, установленной на борту БЛА. Эта задача имеет в настоящее время широкое распространение как в военной сфере, так и в других областях (например, наблюдение с помощью БЛА за перемещением животных). При этом система (аппаратура) наблюдения (видеокамера), установленная на борту БЛА, в ряде случаев не обладает достаточной точностью при слежении за НО, имеющим на фоне окружающей земной поверхности слабую заметность при движении по траектории, которая может изменяться случайным образом.

От точности определения координат НО зависят формирование закона управления и характер траектории автоматически управляемого БЛА, сопровождающего НО [1]. Успешное решение этой задачи в первую очередь зависит от технических возможностей аппаратуры, установленной на БЛА, способности ее распознавать НО и следить за ним на фоне земной поверхности с учетом сложных условий наблюдения: атмосферных осадков, слабой освещенности и других факторов. Такая оптико-электронная аппаратура является дорогостоящей даже по сравнению со стоимостью самого БЛА

и его автопилота, поэтому требуется обеспечение безопасных условий ее применения с помощью беспилотного авиационного комплекса. В то же время установленные на борту БЛА современные недорогие миниатюрные информационные системы обладают большими возможностями по обработке текущей информации, поступающей из различных источников в аппаратуру БЛА, с учетом имеющихся априорных данных, характеризующих закономерности движения НО, возможные ошибки измерителей, другую информацию. Это предоставляет возможность при комплексном использовании на борту БЛА априорной и апостериорной (полученной путем измерений) информации повысить точность определения координат движущегося наземного объекта и повысить эффективность применения БЛА при сопровождении НО.

Математическая модель процесса оценивания параметров движения НО

Математические модели систем видеонаблюдения достаточно изучены и исследованы [2–4]. Точность измерения положения подвижного объекта на земной поверхности (каждая из его прямоугольных координат) определяется техническими возможностями бортовых видеосистем в конкретных условиях применения.

Ошибки этих систем зависят от многих факторов, имеющих различную физическую природу и, как правило, случайную составляющую.

С учетом возможных приближений и допущений применительно к каждой конкретной задаче математическая модель вектора наблюдений $Z(t)$ за координатами НО $X(t)$ представляется в следующем виде:

$$Z(t) = C(X, t) + \eta(t), \quad (1)$$

где $C(X, t)$ – нелинейная функция; $\eta(t)$ – случайная функция, характеризующая ошибки измерений («цветной шум»).

Математическая модель оцениваемого процесса $X(t)$ может быть получена на основе априорных многократных наблюдений за поведением типового наземного объекта (например, животного), который движется по случайной траектории, имеющей свои закономерности, обусловленные целевой установкой поведения НО, его скоростными и маневренными возможностями. Путем статистической обработки результатов априорных измерений, полученных в течение ограниченного интервала времени (считаем, что все полученные экспериментально реализации возможных траекторий движения НО находятся в каждый текущий момент времени внутри интервала 6σ , σ – среднее квадратичное отклонение), можно построить стохастическую динамическую модель изменения координаты перемещения НО по земной поверхности. Пример решения подобной задачи приведен в [5].

Разработанная таким образом математическая модель изменения траектории движения НО может быть использована для корреляционного анализа или для кратковременного прогноза движения НО при отсутствии текущих измерений.

Априорная математическая модель оцениваемого процесса имеет вид

$$\dot{X}(t) = \varphi_1(X, U, t) + \mu(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (2)$$

где $\varphi_1(X, U, t)$ – векторная функция; $U(t)$ – вектор управлений; $\mu(t)$ – случайная функция, характеризующая неопределенности, оказывающие влияние на эволюцию $X(t)$, в виде априорных методических ошибок (неопределенно-

стей) описания математической модели процесса $X(t)$.

Путем расширения вектора состояния $X = [X_1, X_2]^T$ математическую модель процесса $X(t)$ можно преобразовать к виду [6]:

$$\dot{X}(t) = \varphi(X, U, t) + \xi(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (3)$$

где $\xi(t)$ – вектор белых шумов (возмущений) с матрицей интенсивностей $G(t)$;

$$\varphi(X, U, t) = \begin{bmatrix} \varphi_1(X, U, t); \\ \varphi_2(X_1, X_2, t); \end{bmatrix} \quad \xi(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_2 \end{bmatrix};$$

$$\dot{X}_2(t) = \varphi_2(X_2, t) + \xi_2(t).$$

Аналогичным образом путем расширения вектора состояния при инерционном измерителе математические модели измеряемого (оцениваемого) процесса $X(t)$ и измерителя $Z(t)$ могут быть сведены к классической форме. С учетом линеаризации нелинейных функций модели измерителя $Z(t)$ и процесса $X(t)$ имеют вид [6, 7]:

$$Z(t) = C(t)X(t) + \zeta(t); \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= D(t)X(t) + W(t)U(t) + H(t)\xi(t); \\ X(t_0) &= X_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $C(t)$, $D(t)$, $W(t)$, $H(t)$ – матрицы коэффициентов; $\zeta(t)$ – вектор белого шума с матрицей интенсивности $Q(t)$.

Обоснованность рассмотрения в математических моделях (4)–(5) аддитивных белых шумов основана на ограниченности полосы пропускания $\Delta\omega$ входных сигналов аппаратуры, установленной на борту БЛА, что при определенных условиях дает возможность рассматривать в пределах $\Delta\omega$ значения спектральной плотности случайного входного сигнала $S_z(\omega)$, равной постоянному значению, зависящему от $Q(t)$. Следовательно, это позволяет при математическом моделировании измерителя случайного сигнала $Z(t)$ рассматривать постоянную $S_z(\omega)$ во всем возможном диапазоне частот от $-\infty$ до ∞ , что свойственно белому шуму (бесконечный спектр).

Таким образом, с точки зрения математической статистики имеем задачу обработки

данных измерений (наблюдений) с целью уменьшения влияния случайных факторов (ошибок) [6].

Оптимальное оценивание случайного процесса

Точное решение задачи оптимального оценивания получается только для случаев, когда математические модели измерителя и процесса заданы в линейной форме. Для нелинейных систем применяют различные методы линеаризации [6, 7].

Для получения оптимальной (наилучшей из возможных) оценки $\hat{X}(t)$ случайного процесса $X(t)$ при наличии измерений $Z(t)$ задается критерий оптимизации, как правило, в виде среднего квадрата ошибки оценивания

$$M \left[\left(\hat{X}(t) - X(t) \right)^2 \right] \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $M[\dots]$ – символ операции математического ожидания (осреднения).

Используя интегральное уравнение Винера–Хопфа [7], связывающее корреляционные функции входного и выходного сигналов через весовую (импульсную) функцию системы (фильтра) для измерителя и процесса, описываемых выражениями (4)–(5), получают алгоритм оптимального оценивания, называемый фильтром Калмана (Калмана–Бьюси) вида [8]

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t) &= D(t)\hat{X}(t) + W(t)U(t) + \\ &+ R(t)C^T(t)Q^{-1}(t)[Z(t) - C(t)\hat{X}(t)], \\ \hat{X}(t_0) &= M[X_0], \end{aligned} \quad (7)$$

где $R(t)$ – апостериорная корреляционная матрица ошибок оценивания, векторное дифференциальное уравнение для которой имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{R}(t) &= D(t)R(t) + R(t)D^T(t) + \\ &+ H(t)G(t)H^T(t) - R(t)C^T(t)Q^{-1}(t)C(t)R(t), \\ R(t_0) &= R_0. \end{aligned} \quad (8)$$

В большинстве практических задач оцениваемый случайный процесс подчиняется гауссовому (нормальному) распределению на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей. В этом случае в качестве критерия оптимизации может рассматриваться мак-

симум апостериорной плотности вероятности $\hat{f}(X, t)$. При этом в качестве оптимальной оценки вектора состояния $\hat{X}(t)$ принимают такое ее значение, при котором условная плотность вероятности $f(X|Z)$ имеет максимальное значение (критерий МАВ):

$$\begin{aligned} \hat{X}_{\text{МАВ}}(t) &= \operatorname{argmax}_X \hat{f}(X, t) = \\ &= \operatorname{argmax}_X f(X|Z). \end{aligned} \quad (9)$$

Эволюция функции $f(X|Z)$ для моделей процесса и измерителя (4)–(5) описывается уравнением Стратоновича – Кушнера для апостериорной плотности вероятности [7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{f}(X, t)}{\partial t} &= -\nabla_x^T \hat{\pi}(X, t) - \\ &- \frac{1}{2} \left[\rho(\hat{X}, Z, t) - \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\hat{X}, Z, t) \hat{f}(X, t) dX \right] \hat{f}(X, t), \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{\pi}(X, t) &= A(X, t)\hat{f}(X, t) - \\ &- \frac{1}{2} \left[\nabla_x^T (B^T(X, t)\hat{f}(X, t)) \right]^T; \end{aligned} \quad (11)$$

∇_x – векторный оператор дифференцирования, который имеет вид: $\nabla_x^T = [\partial/\partial x_1 \dots \partial/\partial x_n]$; n – размерность вектора $X(t)$; $\rho(\hat{X}, Z, t)$ – функция невязки, вычисляемая по формуле

$$\begin{aligned} \rho(\hat{X}, Z, t) &= \\ &= [Z(t) - C(\hat{X}(t))]^T Q^{-1}(t) [Z(t) - C(\hat{X}, t)]. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставив в выражения (10)–(12) формулу для гауссовой плотности вероятности $f(X|Z)$ и используя известные интегральные формулы теории вероятностей для определения математического ожидания и корреляционной функции, получаем выражения для оптимальной оценки $\hat{X}(t)$. В работе [9] приведены эти выражения, которые имеют такой же вид (7)–(8), как и для критерия оптимизации (6).

Фильтр Калмана производит апостериорную оценку процесса $X(t)$ (формула (7)) и апостериорный корреляционный анализ математических моделей процесса $X(t)$ и измерителя $Z(t)$.

В общем случае фильтр Калмана дает возможность уменьшить влияние шумов измерителя путем учета (прогноза) эволюции оцениваемого процесса $X(t)$ в условиях, когда шумы измерителя $\zeta(t)$ существенно преобладают над шумами $\xi(t)$ математической модели процесса $X(t)$.

При наличии адекватных математических моделей оцениваемого процесса и нескольких его измерителей в работе [10] предложен критерий оптимального оценивания, названный максимумом апостериорного правдоподобия (МАП):

$$\hat{X}_{\text{МАП}}(t) = \underset{\hat{X}}{\operatorname{argmax}} f(X|\hat{X}). \quad (13)$$

Критерий (13) и полученное на основе его применения выражение для оптимальной оценки следует из известной формулы Байеса

$$f(X|Z)f(Z) = f(Z|X)f(X). \quad (14)$$

При гауссовой аппроксимации условной апостериорной плотности вероятности $f(X|\hat{X})$ в соответствии с выражениями (15)–(16) апостериорные оценки процесса и его корреляционной функции в соответствии с критерием МАП для m независимых наблюдений $z_k(t)$ и m фильтров Калмана ($k = \overline{1, m}$) вычисляются по формулам [10]:

$$\hat{x}_{\text{МАП}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \hat{x}_k; \quad \hat{R}_{\text{МАП}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m R_k. \quad (15)$$

Оптимальное оценивание при отсутствии адекватных математических моделей

При решении практических задач оптимального оценивания (фильтрации) результат определяется тем, насколько адекватны математические модели измерителя и процесса их реальным физическим аналогам [11]. Необходимо учитывать, что математические модели процессов $X(t)$ и $Z(t)$ могут отличаться от их реальных физических представлений по причине их неточной структурной и параметрической идентификации, что может приводить к значительным методическим ошибкам фильтрации. В работе [12] показано, как такое несоответствие приводит к ошибкам оценивания (расхождению фильтра).

Анализ рассмотренных выше критериев оценивания и соответствующих им алгоритмов фильтрации показывает, что при отсутствии адекватной математической модели процесса $X(t)$ целесообразно в качестве критерия оценивания рассматривать условную плотность вероятности множества измерений при фиксированном $X(t)$. Такой критерий носит название максимума правдоподобия (МП) [6]

$$\hat{X}_{\text{МП}}(t) = \underset{X}{\operatorname{argmax}} f(Z|X). \quad (16)$$

В соответствии с критерием (13) оптимальная оценка процесса $X(t)$ вычисляется по формуле [13]

$$\hat{X}_{\text{МП}}(t) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Z_k(t), \quad (17)$$

где m – количество измерителей процесса; $z_k(t)$ – выходной сигнал k -го измерителя.

Для реализации алгоритма оценивания в соответствии с критерием (16) необходимо иметь более одного измерителя при наблюдении за объектом.

Для наглядной иллюстрации справедливости сделанных выше теоретических выводов и заключений проведем математическое моделирование в компьютерной среде Matlab-Simulink простейшего процесса фильтрации (оценивания). Необходимо заметить, что при компьютерном моделировании случайных процессов типа белого шума (с бесконечным спектром) следует учитывать то обстоятельство, что теоретически получить такой процесс с помощью «датчика псевдослучайных чисел» на цифровом компьютере невозможно. Однако, несмотря на это обстоятельство, полученные результаты, как правило, вполне приемлемы при решении прикладных инженерных задач, позволяющих делать ряд допущений и приближений по сравнению со строгими математическими выкладками [14, 15].

Для наглядности рассмотрим линейные одномерные математические модели оцениваемого процесса и измерителя вида (4)–(5), в которых зададим: $C(t) = 1$; $D(t) = -2$; $W(t) = 1$; $U(t)$ – гармоническая функция времени, $H(t) = 1$. Интенсивности белых шумов следующие: $G(t) = 0,0025$; $Q(t) = 0,001$.

На рис. 1 представлены результаты моделирования.

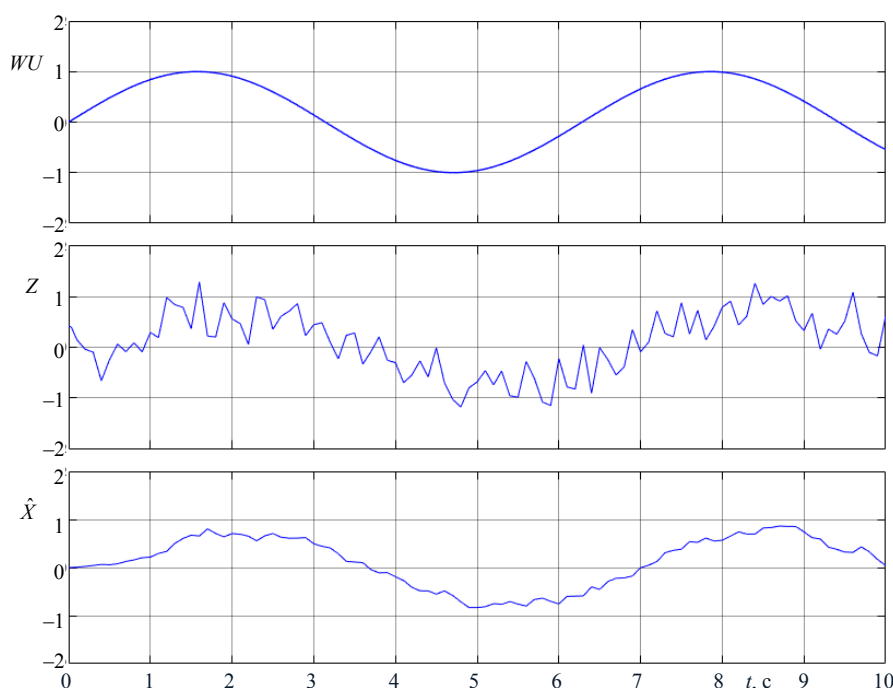


Рис. 1. Результаты моделирования в компьютерной среде Matlab-Simulink простейшего процесса фильтрации (оценивания)

Fig. 1. Results of Matlab-Simulink simulation of a simple filtering (estimation) process

ВЫВОДЫ

1. При разработке алгоритмов оценивания (фильтрации) параметров движения объекта с помощью алгоритмов, основанных на комплексной обработке априорной и апостериорной информации о параметрах движения объекта, необходимо учитывать методические ошибки, возникающие при математическом описании оцениваемого процесса и его измерителя, которые обусловлены неадекватностью математических моделей их физическим оригиналам.

2. Задача алгоритмической (калмановской) фильтрации требует тщательной структурной и параметрической идентификации математических моделей оцениваемого процесса и измерителя. При отсутствии адекватных математических моделей точность оценивания может быть повышена путем применения дополнительных измерителей и их комплексированием, что обосновано соответствующими критериями оценивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобатый, А. А. Управление беспилотным летательным аппаратом при сопровождении подвижного наземного объекта / А. А. Лобатый, П. В. Холод // Системный анализ и прикладная информатика. 2025. № 1. С. 21–26.
2. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / Л. Н. Костишкин, В. С. Гуров, Е. Р. Муратов [и др.]; ред. Л. Н. Костишкина, М. Б. Никифорова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 240 с.
3. Молчанов, А. С. Математическое моделирование цифровых оптико-электронных систем военного назначения при проведении государственных летных испытаний / А. С. Молчанов, Е. В. Чаусов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: сб. материалов VI Всерос. науч.-практ. конф, Москва, 27–28 марта 2019 г. М.: Моск. гос. техн. ун-т имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2019. С. 149–158.
4. Шейников, А. А. Точность определения координат беспилотного летательного аппарата с навигационным комплексом, включающим оптико-электронную систему позиционирования / А. А. Шейников, А. М. Коваленко, А. А. Санько // Научный вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 81–94.
5. Моделирование заторов с использованием данных от блютуз-датчиков о транспортном потоке / Д. В. Навой, А. А. Лобатый, Д. В. Капский, С. А. Ляпин // Информационные и интеллектуальные технологии на транспорте: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Липецк, 2022. С. 171–177.
6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 5 т. 2-е изд., перераб.

- и доп. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2004. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. 640 с.
8. Синицин, И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева / И. Н. Синицин. М.: Ун-тская кн., 2006. 640 с.
 9. Лобатый, А. А. Оптимальное оценивание случайного процесса по критерию максимума апостериорной вероятности / А. А. Лобатый, Ю. Ф. Яцына, Н. Н. Арефьев // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 1. С. 35–41.
 10. Лобатый, А. А. Особенности построения алгоритмов оценивания параметров многомерных случайных процессов / А. А. Лобатый, А. Ю. Бумай // Системный анализ и прикладная информатика. 2020. № 1. С. 24–31.
 11. Лобатый, А. А. Оценка навигационных параметров подвижного объекта в условиях многорежимности / А. А. Лобатый, А. С. Бенкафо // Доклады БГУИР. 2014. № 4 (82). С. 52–58.
 12. Лобатый, А. А. Особенности применения фильтров Калмана–Бьюси в комплексах ориентации и навигации / А. А. Лобатый, А. С. Бенкафо // Доклады БГУИР. 2013. № 5 (75). С. 67–71.
 13. Сейдж, Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс. М.: Связь, 1976. 496 с.
 14. Тюрин, Ю. Н. О проверке датчиков случайных чисел / Ю. Н. Тюрин, В. Э. Фигурнов // Теория вероятности и ее применение. 1990. Т. 35, вып. 1. С. 156–161.
 15. Shestakov, A. L. Об измерении белого шума / A. L. Shestakov, G. A. Sviridyuk // Вестник. ЮУрГУ. Сер. Математическое моделирование и программирование. 2012. Вып. 13. С. 99–108.
 4. Sheinikov A. A., Kovalenko A. M., Sanko A. A. (2023) Accuracy of Determining the Coordinates of an Unmanned Aerial Vehicle with a Navigation System Including an Optical-Electronic Positioning System. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*, 26 (1), 81–94.
 5. Navoy D. V., Lobaty A. A., Kapsky D. V., Lyapin S. A. (2022) Modeling Traffic Jams Using Data from Bluetooth Sensors on Traffic Flow. *Infokommunikatsionnye in i telektual'nye tekhnologii na transporte: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Infocommunication and Intelligent Technologies in Transport: Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference]. Lipetsk, 171–177 (in Russian).
 6. Aleksandrov A. G., Artem'ev V. M., Afanas'ev V. I., Ashimov A. A., Beloglazov I. I., Bukov V. N. [et al.] (1987) *Handbook of Automatic Control Theory*. Moscow, Nauka Publ. 712 (in Russian).
 7. Pupkov K. A., Egupov N. D., Barkin A. I., Voronov E. M., Kon'kov V. G., Korniyushin Yu. P. [et al.] (2004) *Methods of Classical and Modern Automatic Control Theory. Vol. 2: Statistical Dynamics and Identification of Automatic Control Systems*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 640 (in Russian).
 8. Sinitsyn I. N. (2006) *Kalman and Pugachev Filters*. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ. 640 (in Russian).
 9. Lobaty A. A., Yatsyna Yu. F., Arefyev N. N. (2016) Optimal Estimation of a Random Process by the Criterion of Maximum A Posteriori Probability. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, (1), 35–41 (in Russian).
 10. Lobaty A. A., Bumai A. Yu. (2020) Features of Constructing Algorithms for Estimating Parameters of Multivariate Random Processes. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = System Analysis and Applied Information Science*, 2020, (1), 24–31 (in Russian).
 11. Lobaty A. A., Benkafo A. S. (2014) Evaluation of Navigation Parameters of a Moving Object in Multi-Mode Conditions. *Doklady BGUIR*, (4), 52–58 (in Russian).
 12. Lobaty A. A., Bencafo A. S. (2013) Features of the Application of Kalman-Bucy Filters in Orientation and Navigation Systems. *Doklady BGUIR*, (5), 67–71 (in Russian).
 13. Sage A., Melsa J. (1971) *Estimation Theory with Applications to Communication and Control*. New York, McGraw-Hill.
 14. Tyurin Yu. N., Figurnov V. E. (1991) On the Testing of Random Number Generators. *Teoriya Veroyatnosti i Eyo Primenenie = Theory of Probability and its Applications*, 35 (1). <https://doi.org/10.1137/1135022>.
 15. Shestakov A. L., Sviridyuk G. A. (2012) On Measuring White Noise. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe Modelirovanie i Programirovanie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modeling and Programming*, (13), 99–108 (in Russian).

Received: 04.06.2025

Accepted: 07.08.2025

Published online: 30.09.2025

REFERENCES

Adaptive Weighted Mean-Median Filtering for Robust Salt-and-Pepper Noise Removal Technique

Mosam Sangole¹⁾, Swati Gade¹⁾, Dipak Patil¹⁾, Yogesh Risodkar¹⁾, Akhilesh Kumar¹⁾

¹⁾ Sandip Institute of Engineering and Management (Nashik, Republic of India)

Abstract. The primary challenge with image processing applications in automated surveillance, medical, and remote sensing is image denoising. Salt-and-pepper noise (SAPN) drastically reduces image quality by randomly changing pixel values with high intensities. At higher noise densities, the fundamental challenge for conventional filtering algorithms is to balance noise suppression and detail retention. In digital image processing applications accuracy is very important. However, during capturing and transmission, the images are exposed to various noise frequently. In this research article, an Adaptive Weighted Mean-Median Filter (AWMMF) is proposed for robust Salt-and-Pepper Noise Removal Technique. In the proposed work the filtering window size is dynamically adjusted according to the local noise density. AWMMF integrates a weighted combination of mean and median values to enhance restoration quality while preserving image details. The efficacy of the proposed algorithm is evaluated on standard benchmark Lena image and compared with existing denoising techniques like Adaptive Fuzzy Median Filter, Fast and Efficient Median Filter, Nonlinear Hybrid Filter, Improved Adaptive Type-2 Fuzzy Filter, Regeneration Filter, Deep Convolutional Neural Network and Adaptive Switching Modified Decision-Based Unsymmetric Trimmed Median Filter. For the performance analysis, the parameters considered are the Peak Signal-to-Noise Ratio, Mean Squared Error, Structural Similarity Index and Image Enhancement Factor. AWMMF provides a robust and computationally efficient solution for SAPN removal, making it suitable for real-world image processing applications.

Keywords: Adaptive Filtering, Image Denoising, Image Enhancement Factor, Mean Squared Error, Salt-And-Pepper Noise

For citation: Sangole M., Gade S., Patil D., Risodkar Y., Kumar A. (2025) Adaptive Weighted Mean-Median Filtering for Robust Salt-and-Pepper Noise Removal Technique. *Science and Technique*. 24 (5), 350–360. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-350-360>

Адаптивный метод взвешенной фильтрации для удаления шума типа «соль и перец»

Мосам Санголе¹⁾, Свати Гадэ¹⁾, Дипак Патиль¹⁾, Йогеш Рисодкар¹⁾, Ахилеш Кумар¹⁾

¹⁾ Сандипский институт инженерии и менеджмента (Нашик, Республика Индия)

Реферат. Основной проблемой обработки изображений в системах автоматизированного наблюдения, медицины и дистанционного зондирования является устранение шума на изображениях. Шум типа «соль и перец» (Salt-and-pepper noise – SAPN) существенно снижает качество изображения по причине случайного и интенсивного изменения значений пикселей. При более высоких плотностях шума основной проблемой традиционных алгоритмов фильтрации становится поиск баланса между подавлением шума и сохранением деталей сигнала. При цифровой обработке изображений точность проводимых операций очень важна. Однако во время съемки и передачи изображений они часто подвергаются воздействию различных шумов. В данной исследовательской статье предлагается использовать адаптивный взвешенный среднемедианный фильтр (Adaptive Weighted Mean-Median Filter – AWMMF), который обеспечивает надежное применение метода, предназначенного для удаления шума типа «соль и перец». Размер окна фильтрации динамически регулируется в зависимости от локальной плотности шума. Адаптивный взвешенный среднемедианный

Адрес для переписки

Дипак Пандуранг Патиль
Сандипский институт инженерии и менеджмента
«Дип Амрит», Плот № 46+47/3
Гаджанан Чоук, Индранагри, Каматваде
Нашик, Республика Индия
Пин код 422008
dipak.patil@siem.org.in

Address for correspondence

Dipak Pandurang Patil
Sandip Institute of Engineering and Management
“DEEP AMRIT”, Plot No 46+47/3
Gajanan Chowk, Indranagri, Kamatwade
Nashik (MS), Republic of India
Pin Code 422008
dipak.patil@siem.org.in

фильтр объединяет взвешенную комбинацию средних и медианных значений для обеспечения улучшения качества восстановления, сохраняя при этом детали изображения. Эффективность предлагаемого алгоритма оценивается на стандартном эталонном изображении Lena и сравнивается с такими существующими методами шумоподавления, как адаптивный нечеткий медианный фильтр, быстрый и эффективный медианный фильтр, нелинейный гибридный фильтр, улучшенный адаптивный нечеткий фильтр типа 2, фильтр регенерации, глубокая сверточная сеть и адаптивный коммутационный модифицированный несимметричный усеченный медианный фильтр на основе принятия решений. При анализе качества работы предлагаемого метода учитываются следующие параметры: пиковое отношение сигнала, среднеквадратичная ошибка, индекс структурного сходства и коэффициент улучшения изображения. Адаптивный взвешенный среднемедианный фильтр обеспечивает надежное и эффективное решение для удаления шума типа «соль и перец», что позволяет использовать его для реальных приложений обработки изображений.

Ключевые слова: адаптивная фильтрация, шумоподавление изображения, коэффициент улучшения изображения, среднеквадратичная ошибка, шум типа «соль и перец»

Для цитирования: Адаптивный метод взвешенной фильтрации для удаления шума типа «соль и перец» / М. Санголе [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 350–360. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-350-360>

Introduction

In Image denoising is the major issue in the applications of image processing in the fields of remote sensing, medical, and automated surveillance. The salt-and-pepper noise (SAPN) is one of the noises that significantly degrades image quality by randomly replacing pixel values with extreme intensities. In conventional filtering techniques, the main problem is to balance noise suppression and detail preservation, at higher noise densities.

Moreover, in the digital image processing domain, the accuracy of visual data is very important. However, during capturing and transmission, pictures are frequently vulnerable to several kinds of noise. Salt-and-pepper noise (SAPN) is a common type of impulsive noise in the form of random black-and-white pixels, which considerably diminishes image quality and affects subsequent image evaluation processes. Effective removal of SAPN is, therefore, a critical endeavor in enhancing image fidelity.

Conventional denoising techniques, such as the Standard Median Filter (SMF), have been widely employed due to their simplicity and effectiveness in low noise densities. To effectively eliminate the noise candidate the SMF replaces each pixel's value with the median value of the intensities in its neighborhood. However, its performance deteriorates at higher noise levels, leading to blurring and loss of vital image details [1]. In the modified version of SMF the size of the filtering window is dynamically adjusted based on local noise density, aiming to preserve edges while removing noise. Despite its adaptive nature, the AMF can result in excessive smoothing, especially in images with high-density noise, thereby compromising edge

and detail preservation [2]. Recent advancements have seen the emergence of sophisticated methods that blend traditional filtering techniques with modern computational approaches. For instance, the Edge-Adaptive Total Variation (EATV) model segments images into edge and non-edge regions, applying total variation denoising selectively to maintain edge integrity while suppressing noise. This method has demonstrated improved performance in balancing noise reduction and detail preservation [3]. Another notable approach is the Detail-Aware Filter (DAF), which combines median filtering with an adaptive non-local means filter. This hybrid technique effectively reduces noise while retaining intricate image details, outperforming traditional methods in various scenarios [4]. In the realm of high-density noise conditions, the Nonlinear Hybrid Filter (NHF) has been proposed. This filter integrates mathematical morphology operations with a trimmed median filter, enhancing robustness against noise while preserving essential image features [1]. The Regeneration Filter (RF) offers a different strategy by selectively processing noisy pixels based on local context, thereby preserving structural details even in heavily corrupted images [2]. Fuzzy logic-based methods have also gained traction, with the Improved Adaptive Type-2 Fuzzy Filter (IAT2FF) employing type-2 fuzzy logic to distinguish between noisy and noise-free pixels. This approach ensures precise noise removal while maintaining image integrity [3]. The advent of deep learning has further revolutionized denoising techniques. The Deep Convolutional Neural Network (SeConvNet) utilizes selective convolutional blocks to effectively reduce SAPN, particularly at high noise densities, show-

casing the potential of neural networks in image restoration tasks [5].

Even with these advancement in noise elimination of digital images maintaining the optimal balance between noise reduction and detail preservation across varying noise densities is one of the challenge to researchers.

In this research article the authors have proposed a novel Adaptive Weighted Mean-Median Filter (AWMMF) that dynamically assigns weights to mean and median values within a local window, based on estimated noise density. The AWMMF aims to enhance denoising performance while preserving critical image details, addressing the shortcomings of existing methods. This research article contributes:

- A discussion on the various filtering methods to eliminate the SAPN.
- A discussion on the implementation of AWMMF for SAPN elimination.
- A discussion on the superior effectiveness of AWMMF for SAPN elimination over other filters such as Adaptive Fuzzy Median Filter (AFMF), Fast and Efficient Median Filter (FEMF), DAF, NHF, IAT2FF, RF, SeConvNet, and Adaptive Switching Modified Decision-Based Unsymmetric Trimmed Median Filter (ASMDBUTMF).

The article is structured as follows: Literature review followed by introduction is presented in Section 2. The proposed algorithm of AWMMF is elaborated in Section 3. Results and discussion are presented in Section 4 followed by the Conclusion.

Literature Review

In the field of digital image processing elimination of SAPN is the biggest challenge and many researchers are working on that. From the literature, it is concluded that over the past decade, numerous methodologies have been proposed, including conventional median filtering techniques, and advanced adaptive and hybrid models. In conventional filters like SMF, the value of each pixel is replaced with the median of the intensities within a defined neighborhood. It is more effective for low-noise density however tends to blur the image at higher noise levels. A modified version of SMF is an adaptive Median Filter (AMF) which adjusts window size based on local noise density. AMF can result in excessive smoothing, especially in

images with significant noise [6]. Another type of filter used to eliminate SAPN is decision-based and switching filters (DBA). It replaces noisy pixels using neighboring values but may cause artifacts at high noise levels. In its modified version decision-based unsymmetric trimmed median filter the performance is improved by a trimming process in high-noise conditions [7]. Further the performance is enhanced by using adaptive threshold mechanism for detecting noisy pixels in ASMDBUTMF. For restoration, an unsymmetric trimmed median filter is applied. As a result ASMDBUTMF preserves fine anatomical details in MRI images more effectively than DBA [8]. In fuzzy logic based filters fuzzy reasoning is used to determine the level of noise corruption. In AFMF, based on the detected noise level median median filtering is applied to eliminate the noise [9]. Modified version IAT2FF detects noise using an enhanced adaptive type-2 fuzzy noise identifier. Moreover for restoration, it applies a modified ordinary fuzzy logic approach [10]. For High noise densities FEMF was implemented which identifies natural pixels for restoration based on prior information. It does not rely on iterative noise detection. It is ideal for swift processing applications because of its simple logic and rapid execution [11]. Morphological filters analyze the geometric structure of images and combined with statistical methods to improve denoising performance. NHF integrates mathematical morphology operations with a trimmed median filter [12]. Edge-Preserving and Detail-Aware Filters uses the EATV model. Maintains the edge integrity while reducing the noise level by applying the total variation denoising selectively [3, 13]. In regeneration filter high-density SAPN is eliminated by selectively processing noisy pixels. It maintains image integrity by preserving uncorrupted pixels. RF works in two phases: noise identification via adaptive threshold and reconstruction using neighboring pixels [14]. Researchers also used deep learning based approaches to eliminate SAPN. Convolutional Neural Networks (CNN) are trained to distinguish and eliminate noise patterns. Deep CNNs with selective convolutional blocks can efficiently minimize SAPN at high densities. These models perform better by learning intricate mappings from noisy to clean images. However, it requires signi-

ficant computational resources and extensive training datasets [5].

From the literature, it is concluded that researchers have explored innovative strategies for SAPN removal. A two-step method involving a median-type filter followed by an adaptive non-local bilateral filter has been proposed to address the limitations of traditional filters. This approach effectively weakens median filter errors and preserves image details [13]. Additionally, methods incorporating noise detection strategies with non-convex sparsity regularization have shown promise in accurately identifying and removing noise while maintaining image integrity [15].

The evolution of SAPN removal techniques reflects a balance between noise suppression and detail preservation. Traditional methods offer simplicity and speed; however, they have limitations in maintaining image quality at high noise levels. On the other hand, adaptive, fuzzy logic-based, and deep learning approaches provide enhanced performance but may introduce complexity and computational demands. Ongoing research continues to seek methods that effectively combine efficiency with high-quality denoising outcomes. The authors have proposed the AWMMF for SAPN elimination.

Methodology

From the literature, it is concluded that while elimination of the SAPN at high noise density SMF and AMF have limitations in maintaining the balance between noise reduction and detail preservation. To address these problems authors have proposed AWMMF which dynamically adjusts the filtering process based on local noise density, assigning adaptive weights to the mean and median values within a local window. In this study, the authors have utilized standard grayscale test images of Lena [16]. This image is artificially corrupted with varying densities (10 to 90 %) of SAPN to simulate real-world conditions. The step-by-step procedure of the proposed AWMMF methodology is presented below:

Step 1: Noise Detection. For each pixel in the image, define a sliding window centered on the current pixel.

Identify whether the current pixel is a noisy or non-noisy candidate from its intensity (minimum or maximum possible value).

Step 2: Adaptive Window Adjustment. If the current pixel is a noise candidate, initialize the window size to a predefined minimum (e.g., 3×3).

Expand the window size incrementally (e.g., to 5×5 , 7×7) until a sufficient number of non-noisy pixels are found or a maximum window size is reached.

Step 3: Weight Calculation. Within the determined window, calculate the median (Med) and mean (Mean) of the non-noisy pixels.

Estimate the local noise density (ρ)

$$\rho = \frac{\text{noisy pixels}}{\text{total number of pixels window}}.$$

Compute the weighting factor (α) based on ρ , where $\alpha = f(\rho)$ is a monotonically increasing function ensuring $0 \leq \alpha \leq 1$.

Step 4: Pixel Restoration. Replace the noisy pixel's value (P) with a weighted combination of the median and mean:

$$P_{\text{new}} = \alpha \times \text{Mean} + (1 - \alpha) \times \text{Med}.$$

If the current pixel is not noisy, retain its original value.

Step 5: Iterative Processing. Repeat the above steps for each pixel in the image until the entire image is processed.

Results and Discussion

In this proposed work the AWMMF algorithm is written in a MATLAB environment and Intel Core i5 processor and 16GB RAM system is used for execution. To analyze the efficacy of the proposed AWMMF standard grayscale test images of Leena are artificially corrupted with varying densities (10 to 90 %) of SAPN to simulate real-world conditions. The performance of the AWMMF has been compared with the seven existing filters AFMF, FEMF, DAF, NHF, RF, IAT2FF, SeConvNet, and ASMDBUTMF for the varying noise densities (10 to 90 %). The performance is compared based on their Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Mean Squared Error (MSE), and Structural Similarity Index (SSIM) and the Image Enhancement Factor (IEF). The detail discussion of the each performance parameter is given below.

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR). PSNR basically indicates the image quality and given by,

$$PSNR = \frac{\text{maximum possible power of a signal}}{\text{power of noise}}. \quad (1)$$

For better noise suppression PSNR of the filter should be high [16]. The results obtained for PSNR of all the filters considered in this study are given in Table 1.

From Table 1 it is clear that AWMMF consistently yields the highest PSNR at every noise level. This demonstrates that it retains image quality better than other methods under increasing noise.

Fig. 1 shows the graph of PSNR for all the filters under study for the noise level 10 to 90. From Fig. 1 it is observed that for the Deep Learning

Filters considered for this study i.e. SeConvNet and IAT2FF the PSNR values remain constant and low indicating that they are not well trained or not suitable for the noise level considered for this study. They are not performing well compared to traditional filters and the proposed AWMMF.

PSNR for NHF and RF declined steadily with an increase in noise level. A low value of PSNR indicates that they have poor noise suppression and image restoration. From the graphs, it is found that for lower noise levels (10 to 30) the performance of the proposed AWMMF is similar to FEMF, AFMF, and ASMDBUTMF. However, for higher noise levels the PSNR for other filters decreased considerably compared to AWMMF which proves the superior performance and robustness of the proposed AWMMF at high noise densities.

Table 1

PSNR for filters under study for varying noise density

Noise	AFMF	FEMF	DAF	NHF	RF	IAT2FF	SeConvNet	ASMDBUTMF	AWMMF
10	35.39733	35.90229	31.75012	28.0879	29.76457	15.25033	15.25033	35.90229	35.94136
20	31.01415	32.05459	28.12879	22.28446	24.93479	12.21703	12.21703	32.05459	32.13226
30	27.71355	30.35453	23.2121	17.5408	21.9033	10.46196	10.46196	30.34921	30.46994
40	24.30438	28.91913	18.67052	13.98804	19.52521	9.209097	9.209097	28.87144	29.08077
50	21.17886	27.49012	15.01558	11.51263	17.56481	8.23075	8.23075	27.28456	27.66278
60	18.52804	26.61401	12.08999	9.713606	15.92049	7.436238	7.436238	25.74744	26.77853
70	16.32833	25.67214	9.865479	8.41461	14.53965	6.787401	6.787401	23.48028	25.81697
80	14.29431	24.62507	7.955471	7.378486	13.22843	6.201846	6.201846	20.2284	24.75186
90	12.50589	23.06581	6.421403	6.494591	12.02737	5.673323	5.673323	16.50731	23.10802

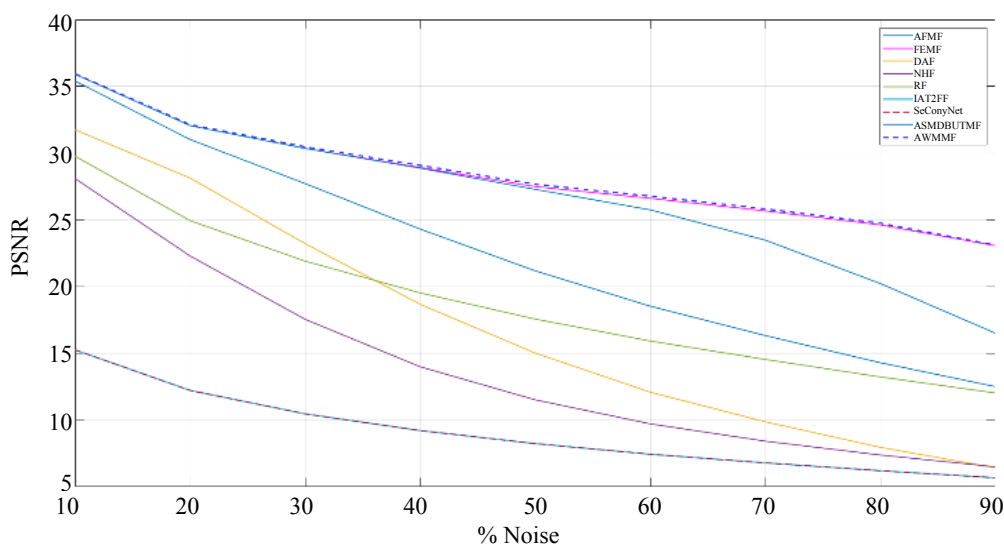


Fig. 1. PSNR for varying noise density

4.2. Mean Squared Error (MSE). MSE indicates the denoising capability of the filter and is given by

$$MSE = \frac{1}{HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (O_{(i,j)} - D_{(i,j)})^2, \quad (2)$$

where H and W are the height and width of the image respectively.

$O(i, j)$ and $D(i, j)$ are the pixel value of the original and denoised images at position (i, j) respectively.

For superior denoising performance the filters should have minimum MSE [17]. Table 2 presents the MSE for all filters considered for this study at various noise densities. From the Table 2, it is con-

cluded that MSE for AWMMF is the lowest compared to all the filters for all the noise densities proving the accuracy of the proposed AWMMF. Fig. 2 shows the graph of MSE for all filters with varying noise densities.

From Fig. 2 it is observed that MSE for DAF, NHF, IAT2FF, and SeConvNet is highest for all noise densities resulting in the filters being less accurate. AFMF and RF perform moderately below 40 % noise levels however their stability is not strong at higher noise densities. For low noise densities MSE for ASMDBUTMF and FEMF is quite similar to AWMMF but as the noise density increases the MSE also increases drastically compared to the proposed AWMMF.

Table 2

MSE for filters under study for varying noise density

Noise	AFMF	FEMF	DAF	NHF	RF	IAT2FF	SeConvNet	ASMDBUTMF	AWMMF
10	18.76495	16.70517	43.45785	100.9927	68.64732	1941.097	1941.097	16.70517	16.55559
20	51.48322	40.51554	100.0463	384.2679	208.7379	3902.813	3902.813	40.51554	39.79739
30	110.0843	59.92761	310.3636	1145.514	419.5179	5846.344	5846.344	60.00106	58.35608
40	241.3473	83.40019	883.1375	2595.83	725.3691	7801.366	7801.366	84.32107	80.35318
50	495.6717	115.896	2048.907	4590.054	1139.199	9772.493	9772.493	121.5135	111.3787
60	912.5915	141.8012	4018.665	6945.76	1663.534	11734.28	11734.28	173.1155	136.5299
70	1514.424	176.1435	6707.064	9367.406	2286.207	13625.12	13625.12	291.7779	170.366
80	2419.077	224.1679	10411.98	11891.37	3091.983	15591.78	15591.78	616.9362	217.7182
90	3651.667	320.9955	14823.13	14575.43	4077.023	17609.54	17609.54	1453.28	317.8909

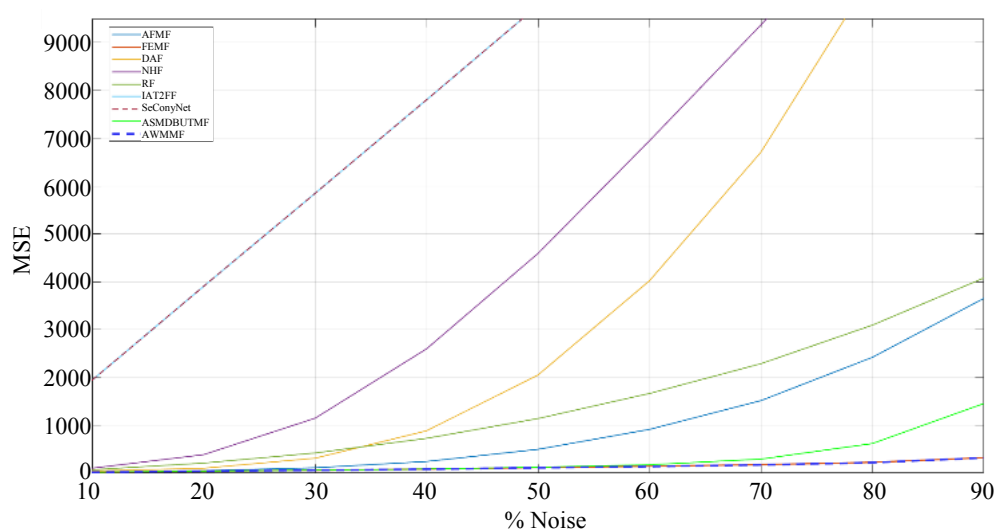


Fig. 2. MSE Comparison of different filters across noise density

Structural Similarity Index (SSIM). SSIM represents the restoration capability of the filters and is given by

$$SSIM(O, D) = \frac{(2\mu_O\mu_D + C_1)(2\sigma_{OD} + C_2)}{(\mu_O^2 + \mu_D^2 + C_1)(\sigma_O^2 + \sigma_D^2 + C_2)}, \quad (3)$$

where μ_O , μ_D – mean intensity of original image O and denoised image D respectively; σ_O^2 , σ_D^2 – variance of original image O and denoised image D respectively; σ_{OD} – covariance between original image O and denoised image D ; C_1 , C_2 – small constant to stabilize the division.

The filters with better image restoration quality has SSIM near to unity [17]. Table 3 shows the comparison of SSIM for all filters under study for the varying noise density. From Table 3 it is concluded that SSIM for AWMMF at low noise density

is 0.97872 and 0.731431 at highest noise density indicating the consistency of the proposed AWMMF compared to other filters under study.

From Fig. 3 it is found that IAT2FF and SeConvNet are having very low SSIM for all noise density levels. It suggests that these models fail to preserve the image details under SAPN. SSIM for DAF, NHF, and RF decreases with an increase in noise density indicating the poor performance in maintaining the quality of the image. From the graph, it is observed that FEMF and AFMF perform well for the noise densities below 30 % however the SSIM drops down drastically as the noise density increases. The SSIM for ASMDBUTMF and proposed AWMMF is almost equal at low noise densities but it falls to 0.327303 at 90 % noise level for ASMDBUTMF. This proves that the proposed AWMMF preserves the image details at all noise densities.

Table 3

SSIM for filters under study for varying noise density

Noise	AFMF	FEMF	DAF	NHF	RF	IAT2FF	SeConvNet	ASMDBUTMF	AWMMF
10	0.975364	0.978548	0.902207	0.858706	0.791894	0.18369	0.18369	0.978548	0.97872
20	0.939636	0.958276	0.852765	0.706201	0.589516	0.090043	0.090043	0.958276	0.95903
30	0.861298	0.940857	0.704129	0.466918	0.434423	0.055817	0.055817	0.940685	0.942549
40	0.706129	0.921426	0.456839	0.264999	0.3202	0.038711	0.038711	0.919215	0.924624
50	0.510069	0.898153	0.236385	0.155046	0.237748	0.027057	0.027057	0.885013	0.902765
60	0.330928	0.873117	0.11035	0.089764	0.177746	0.019458	0.019458	0.810986	0.878218
70	0.206861	0.842543	0.054127	0.0533	0.130361	0.013836	0.013836	0.683534	0.847725
80	0.128468	0.8015	0.02784	0.030233	0.09595	0.010235	0.010235	0.497628	0.806353
90	0.074095	0.729509	0.012057	0.01353	0.062018	0.005928	0.005928	0.327303	0.731431

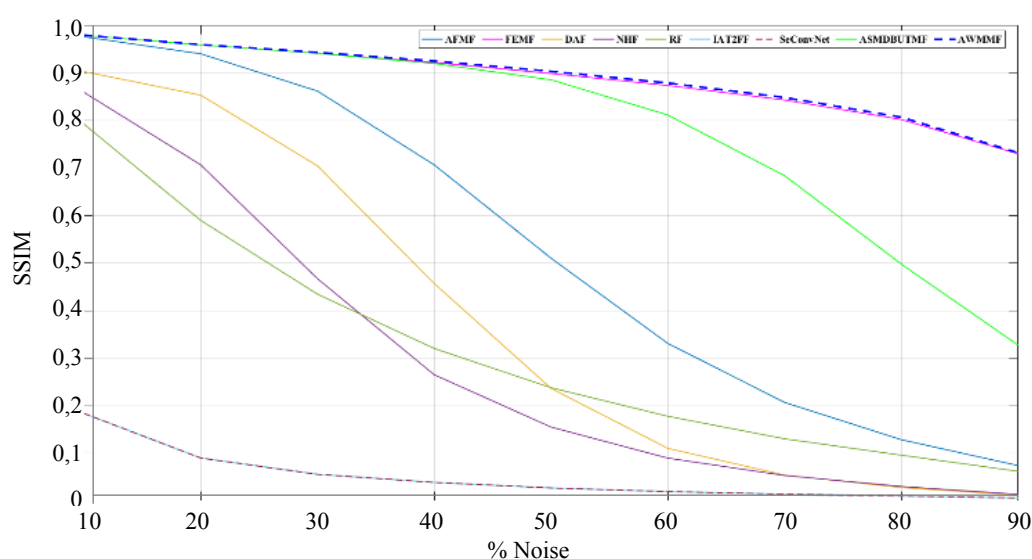


Fig. 3. SSIM of all filters with varying noise density

Image Enhancement Factor (IEF). The efficacy of the image enhancement or restoration algorithm is also evaluated by IEF which is a quantitative metric. The Image Enhancement Factor quantifies how much an enhanced image improves over a noisy or degraded image, in relation to the original image. It is calculated as follows:

$$IEF = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x(i,j) - O(i,j))^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f(i,j) - O(i,j))^2}, \quad (4)$$

where $O(i,j)$ is the original image; $x(i,j)$ is the Noisy image; $f(i,j)$ is the filtered image.

Table 4 shows the comparison of IEF for all filters under study for the noise density range from 10 to 90. Higher value of IEF means better enhancement of the image. From the Table 4 it is conclude

that for AWMMF the value of IEF is highest for all the noise levels compared to all filters.

Fig. 4 shows the comparison of the graph of IEF of all filters with varying noise densities. From the Fig. 4 it is conclude that in case of traditional filters like NHF and RF for low noise densities image enhancement is good but for higher noise level the image is degraded. On the other hand for IAT2FF, the IEF is constant 1 for all noise densities which means that the image enhancement is negligible. While comparing the IEF value for SeConvNet it is observed that it is consistently remain below 2, indicating either inadequate generalization, inefficient training, or restricted tolerance to salt-and-pepper noise in this particular situation. At low noise level AFMF and ASMDBUTMF performs well however with increase in the noise level the IEF value decreases. The FEMF and AWMMF perform similarly, while the AWMMF has the greater IEF.

Table 4

IEF for filters under study for varying noise density

Noise	AFMF	FEMF	DAF	NHF	RF	IAT2FF	SeConvNet	ASMDBUTMF	AWMMF
10	98.86405	113.8041	43.61288	18.39216	27.9361	1	0.913798	113.8041	114.7465
20	81.71998	107.0806	39.70718	10.50791	18.98984	1	1.39623	107.0806	108.9917
30	52.08079	96.79249	18.56904	5.099624	13.90591	1	1.715288	96.72941	99.77455
40	33.54832	93.31618	9.127153	3.087682	10.8069	1	1.875194	92.69405	96.74793
50	20.40314	84.99859	4.892097	2.182304	8.696367	1	2.08473	81.42757	88.56061
60	12.88907	83.06283	2.933908	1.694546	7.038211	1	1.569965	68.16943	86.52421
70	8.93947	78.02919	2.012163	1.453138	5.924151	1	1.759722	45.86859	80.70468
80	6.455024	68.19781	1.5037	1.31052	5.049117	1	1.901367	25.10251	70.12437
90	4.850621	53.51262	1.193024	1.210347	4.341645	1	1.848439	12.11493	54.10665

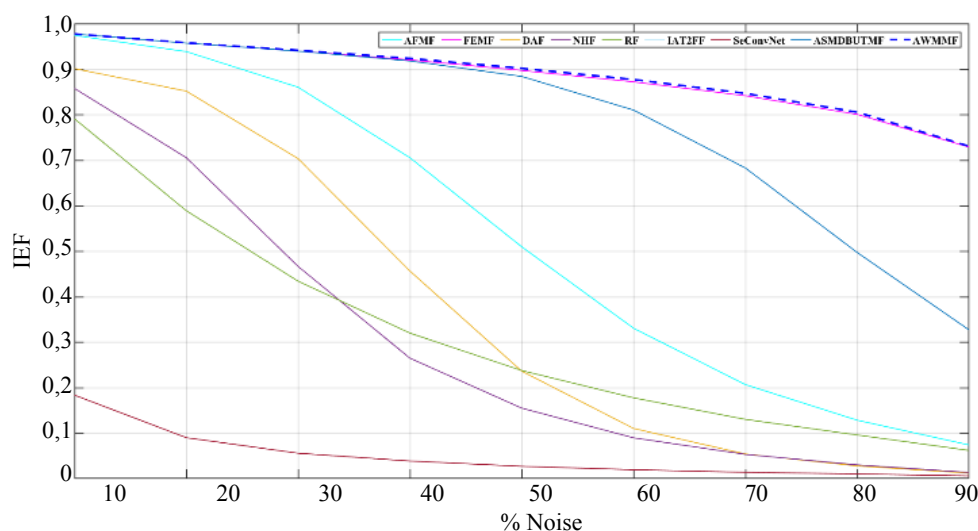


Fig. 4. IEF of all filters with varying noise density

Fig. 5 shows the input image, noisy image, and output images of all the filters considered for this study with various noise densities. From Fig. 4 it is observed that Traditional filters (AFMF, FEMF) perform well at low noise and perform poorly at high noise. DAF, NHF, and RF perform poorly at even medium noise with lots of blurring. For IAT2FF, SeConvNet the performance is very poor at all noise levels. ASMDBUTMF performs decent to moderate noise levels but the performance is degraded at high noise levels.

The proposed AWMMF performs well at all noise levels.

From the above comparative analysis for various parameters of all the filters, it is clear that the proposed AWMMF outperforms traditional denoising methods across various noise densities. The adaptive weighting mechanism allows AWMMF to effectively balance noise reduction and detail preservation. While SMF and AMF are effective at lower noise densities, their performance degrades significantly as noise density increases.

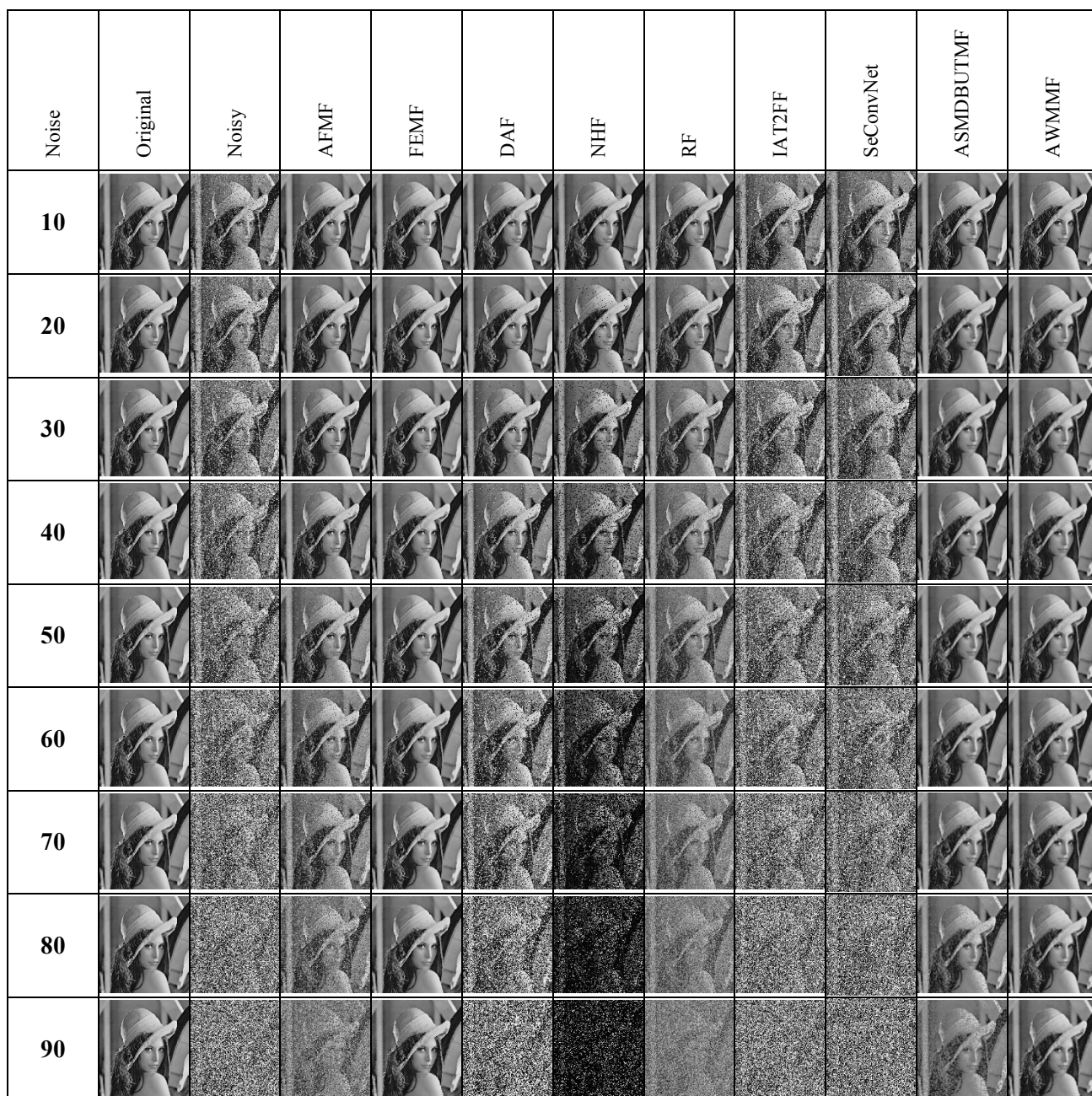


Fig. 5. Visual performance of AWMMF compared to other filters under study

DBA shows improved performance over SMF and AMF but still falls short compared to AWMMF, especially at higher noise levels. The superior performance of AWMMF can be attributed to its adaptive nature, which adjusts the filtering parameters based on local noise characteristics. This adaptability enables AWMMF to maintain high image quality even under challenging conditions. The AWMMF offers several advantages over conventional filters such as adaptive nature of the filter effectively handles varying noise densities. It maintain the balance between noise reduction and image detail Preservation because of use of mean and median values. The iterative approach and dynamic adjustments make the filter robust against high-density noise scenarios, where traditional filters often fail.

Conclusion

In this article, we have proposed the AWMMF filtering for eliminating the SAPN effectively noise in digital images. Moreover, the PSNR, MSE, and SSIM of AWMMF compared with the seven state-of-the-art filters using the benchmark Leena image at varying noise density from 10% to 90%. From the comparative analysis it is found that the AWMMF ensured superior noise reduction while maintaining image details, making it a robust and efficient choice for image restoration tasks.

The novelty of Key findings include as following:

- AWMMF consistently achieved higher PSNR values and lower MSE across all noise densities.
- The proposed AWMMF exhibited superior SSIM performance, indicating better structural preservation and visual quality.
- Unlike conventional methods, AWMMF dynamically adjusted its filtering strategy based on local noise density, providing enhanced adaptability to varying noise levels.

These results highlight AWMMF's effectiveness in medical imaging, remote sensing, and surveillance, where high-quality image restoration is critical. The future work could integrate AWMMF with deep learning models to enhance the performance and explore the effectiveness of AWMMF with other types of noises such as Gaussian, speck-

le, and Poisson noise, expanding its versatility across imaging domains.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare that they have no known conflict of interest that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Nomenclature

AWMMF	Adaptive Weighted Mean-Median Filter
SMF	Standard Median Filter
AMF	Adaptive Median Filter
RF	Regeneration Filter
NHF	Nonlinear Hybrid Filter
EATV	Edge-Adaptive Total Variation
DAF	Detail-Aware Filter
AFMF	Adaptive Fuzzy Median Filter
IAT2FF	Improved Adaptive Type-2 Fuzzy Filter
SeConvNet	Deep Convolutional Neural Network
FEMF	Fast and Efficient Median Filter
ASMDBUTMF	Adaptive Switching Modified Decision-Based Unsymmetric Trimmed Median Filter
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
MSE	Mean Squared Error
SSIM	Structural Similarity Index
IEF	Image Enhancement Factor

REFERENCES

1. Erkan U., Kilicman A. (2016) Two new Methods for Removing Salt-And-Pepper Noise From Digital Images. *ScienceAsia*, 42 (1), 28–32, 2016.
2. Alanazi T. M., Berriri K., Albekairi M., Ben Atitallah A., Sahbani A., Kaaniche K. (2023) New Real-Time High-Density Impulsive Noise Removal Method Applied to Medical Images. *Diagnostics*, 13 (10), 1709. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13101709>.
3. Jiang Y., Wang H., Cai Y., Fu B. (2022) Salt and Pepper Noise Removal Method Based on the Edge-Adaptive Total Variation Model. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 8. <https://doi.org/10.3389/fams.2022.918357>.
4. Mohan S., Paulchamy B. (2024) Removal of Salt and Pepper Noise Using Adaptive Switching Modified Decision-Based Unsymmetric Trimmed Median Filter Optimized with Hyb-BCO-FBIA. *Automatika*, 65 (3), 852–865. <https://doi.org/10.1080/00051144.2024.2321807>.

5. Rafiee A. A., Farhang M. (2023) A Deep Convolutional Neural Network for Salt-and-Pepper Noise Removal Using Selective Convolutional Blocks. *Applied Soft Computing*, 145, 110535. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110535>.
6. Hwang H., Haddad R. A. (1995) Adaptive Median Filters: New Algorithms and Results. *IEEE Transactions on Image Processing*, 4 (4), 499–502. <https://doi.org/10.1109/83.370679>.
7. Esakkirajan S., Veerakumar T., Subramanyam A. N., Premchand C. H. (2011) Removal of High Density Salt and Pepper Noise Through Modified Decision Based Unsymmetric Trimmed Median Filter. *IEEE Signal Processing Letters*, 18 (5), 287–290. <https://doi.org/10.1109/lsp.2011.2122333>.
8. Sheela C. J. J., Suganthi G. (2020) An Efficient Denoising of Impulse Noise From MRI Using Adaptive Switching Modified Decision Based Unsymmetric Trimmed Median Filter. *Biomedical Signal Processing and Control*, 55, 101657. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101657>.
9. Toh K. K. V., Isa N. A. M. (2010) Noise Adaptive Fuzzy Switching Median Filter for Salt-and-Pepper Noise Reduction. *IEEE Signal Processing Letters*, 17 (3), 281–284. <https://doi.org/10.1109/lsp.2009.2038769>.
10. Singh V., Agrawal P., Sharma T., Verma N. K. (2022) Improved Adaptive type-2 Fuzzy Filter with Exclusively Two Fuzzy Membership Function for Filtering Salt and Pepper Noise. *Multimedia Tools and Applications*, 82 (13), 20015–20037. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14248-2>.
11. Hsieh M.-H., Cheng F.-C., Shie M.-C., Ruan, S.-J. (2013) Fast and Efficient Median Filter for Removing 1–99 % Levels of Salt-and-Pepper Noise in Images. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26 (4), 1333–1338. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.10.012>.
12. Irum I., Sharif M., Raza, M., Mohsin S. (2015) A Non-linear Hybrid Filter for Salt & Pepper Noise Removal from Color Images. *Journal of Applied Research and Technology*, 13(1), 79–85. [https://doi.org/10.1016/s1665-6423\(15\)30015-8](https://doi.org/10.1016/s1665-6423(15)30015-8).
13. Liang H., Li N., Zhao S. (2021) Salt and Pepper Noise Removal Method Based on a Detail-Aware Filter. *Symmetry*, 13 (3), 515. <https://doi.org/10.3390/sym13030515>.
14. Ivković R. M., Milošević I. M., Milivojević, Z. N. (2024) Regeneration Filter: Enhancing Mosaic Algorithm for Near Salt & Pepper Noise Reduction, *Sensors*, vol. 25, No 1, 1–22. <https://doi.org/10.20944/preprints202411.0737.v1>.
15. Chen Y., Huang Y., Wang L., Huang H., Song J., Yu C., Xu Y. (2022) Salt and Pepper Noise Removal Method Based on Stationary Framelet Transform with Non-Convex Sparsity Regularization. *IET Image Processing*, 16 (7), 1846–1865. <https://doi.org/10.1049/ipr2.12451>.
16. Gonzalez R. C., Woods R. E. (2018) *Digital Image Processing*. 4th ed. Pearson.
17. Zhou Wang, Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. (2004) Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13 (4), 600–612. <https://doi.org/10.1109/tip.2003.819861>.

Received: 10.06.2025

Accepted: 18.08.2025

Published online: 30.09.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-361-372>

УДК 621.785.4:791

Влияние постсварочной термической обработки на механические свойства и характер разрушения сварных соединений стали Р91

Инж. А. Л. Миньков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Жаропрочная сталь Р91 с высоким содержанием хрома используется при изготовлении элементов котлов и паропроводов, работающих под давлением пара до 31 МПа и при температурах до 600 °С. Однако повышенная диффузионная ползучесть, обуславливающая образование в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения трещин III или IV типов, значительно снижает срок эксплуатации сварных конструкций из данной стали. Цель работы – разработка технологии, включающей до- и постсварочную термическую обработку стали, позволяющую обеспечить равенство значений микротвердости сварного шва и ЗТВ при сохранении ее высокой ударной вязкости. В работе исследовано влияние режимов постсварочной термической обработки стали Р91 на механические свойства и характер разрушения при испытании на ударный изгиб ослабленного участка в зоне термического влияния. Получены экспериментальные зависимости усилия разрушения от времени при ударе маятника и прогиба образцов от усилия разрушения, с использованием которых определены: энергия зарождения трещины, полная энергия разрушения, максимальная величина прогиба образца до разрушения, максимальное усилие и усилие разрушения, время до разрушения. Показано, что сочетание пятикратной досварочной термоциклической обработки (ТЦО) в диапазоне температур 700–1050 °С с дальнейшей TIG сваркой с тепловложением не более 4,4 кДж/см в каждый проход и пятикратной постсварочной ТЦО в диапазоне 700–1050 °С с последующей пятикратной ТЦО в диапазоне 300–700 °С позволяет повысить значения ударной вязкости до 96,8 Дж/см² в ослабленном участке зоны термического влияния, что значительно превышает величину ударной вязкости (29 Дж/см²) в ослабленном участке ЗТВ при стандартной термической обработке. При этом за счет до- и постсварочной ТЦО удалось добиться максимальной стабильности значений микротвердости в ЗТВ.

Ключевые слова: сталь Р91, сварные соединения, постсварочная термоциклическая обработка, зона термического влияния, микротвердость, излом, ударная вязкость

Для цитирования: Миньков, А. Л. Влияние постсварочной термической обработки на механические свойства и характер разрушения сварных соединений стали Р91 / А. Л. Миньков // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 361–372. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-361-372>

Influence of Post-Weld Heat Treatment on Mechanical Properties and Fracture Character of Welded Joints of Steel Grade P91

A. L. Minkov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Steel P91 is a heat-resistant steel with a high chromium content used in the manufacture of boiler and steam pipeline components operating at steam pressures up to 31 MPa and temperatures up to 600 °C. However, increased diffusion

Адрес для переписки

Миньков Артем Леонидович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/14,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-71
minkov@bntu.by

Address for correspondence

Minkov Artem L.
Belarusian National Technical University
65/14, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: 375 17 293-93-71
minkov@bntu.by

creep, which causes the formation of type III or IV cracks in the heat-affected zone (HAZ) of a welded joint, significantly reduces the service life of welded structures made from this steel. The purpose of the work is to develop a technology combining pre- and post-weld heat treatment (PWHT) of steel to ensure equality of the microhardness values of the weld and HAZ, while maintaining its high impact toughness. The work investigates the effect of PWHT regimes of P91 steel on the mechanical properties and nature of destruction during impact bending testing of a weakened sector in the HAZ. Experimental dependences of the fracture force on time during a pendulum impact and the deflection of samples on the fracture force were obtained, using which the following were determined: crack initiation energy, total fracture energy, maximum deflection of the sample before fracture, maximum force and fracture force, time before fracture. It is shown that a combination of fivefold pre-weld thermal cycling treatment (TCT) in the temperature range of 700–1050 °C with subsequent TIG welding with heat input of no more than 4.4 kJ/cm in each pass and fivefold post-weld TCT in the range of 700–1050 °C with subsequent fivefold TCT in the range of 300–700 °C allows to increase the impact toughness values to – 96.8 J/cm² in the weakened HAZ zone, which significantly exceeds the impact toughness value (29 J/cm²) in the weakened HAZ zone during standard heat treatment. At the same time, due to pre- and post-weld TCT, it was possible to achieve maximum stability of microhardness values – in the HAZ.

Keywords: steel grade 91, welded joints, post-weld thermocyclic heat treatment, heat affected zone, microhardness, fracture, impact toughness

For citation: Minkov A. L. (2025) Influence of Post-Weld Heat Treatment on Mechanical Properties and Fracture Character of Welded Joints of Steel Grade P91. *Science and Technique*. 24 (5), 361–372. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-361-372> (in Russian)

Введение

Высокохромистая сталь ферритно-мартенситного класса P91 (российский аналог 10X9МФБ) относится к жаропрочным сталям. Она была разработана в середине 1970-х гг. для изготовления толстостенных элементов котлов (колонна, магистральная паровая труба и др.) и трубопроводов-паропроводов ядерных реакторов, работающих при давлении пара до 31 МПа и температуре до 600 °C. В табл. 1 приведен химический состав стали марки P91.

Технология производства труб из стали P91 – горячая прокатка с последующей нормализацией от температуры 1050 °C. Сварку толсто-

стенных труб проводят с большим количеством проходов и с минимальным тепловложением в каждый наплавляемый слой. Стандартная постсварочная термическая обработка (ПТСО): нормализация от 1050 °C и высокий отпуск 700 °C.

Многопроходную сварку образцов труб диаметром 48,5 мм и толщиной 6,08 мм (рис. 1) проводили методом TIG в среде аргона с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход в горизонтальном положении. Сварка осуществлялась в четыре прохода при силе сварочного тока 90–110 А и напряжении дуги 12–14 В.

В табл. 2 показаны режимы досварочной [2, 3] и постсварочной термообработки.

Таблица 1

Химический состав стали марки P91 [1]

Chemical composition of steel grade P91 [1]

Элемент	C	Cr	Mo	Si	Mn	V	Nb	N	Fe
% мас.	0,10	9,00	0,92	0,23	0,46	0,18	0,08	0,084	Основа

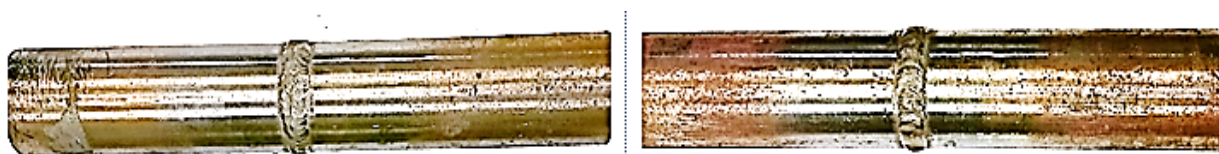


Рис. 1. Внешний вид сваренных образцов из стали P91

Fig. 1. External appearance of welded samples of steel P91

Таблица 2

Режимы до- и постсварочной термической обработки
Pre- and post-weld heat treatment modes

Обозначение режима термической обработки	Последовательность и режимы операций
ТО 1	Нормализация в диапазоне 20–1050 °С с выдержкой 30 мин при 1050 °С с последующим охлаждением на воздухе до 20 °С, далее предсварочный подогрев до 250 °С, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем нормализация при 20–1050 °С с выдержкой 30 мин и высокий отпуск (720 °С) с выдержкой 30 мин и последующим охлаждением на воздухе до 20 °С
ТО 2	Двойная нормализация в диапазоне 20–1050 °С с выдержкой 30 мин при 1050 °С с последующим охлаждением на воздухе до 20 °С, далее предсварочный подогрев до 250 °С, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем двойная нормализация при 20–1050 °С с выдержкой 30 мин при 1050 °С с последующим охлаждением на воздухе до 20 °С
ТО 3	Высокотемпературная трехкратная термоциклическая обработка (ТЦО) в диапазоне 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение до 700 °С с двукратным повторением, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем трехкратная высокотемпературная ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин, охлаждение до 700 °С с двукратным повторением и охлаждение на воздухе с 700 до 20 °С
ТО 4	Высокотемпературная пятикратная ТЦО в диапазоне 700–1050 °С со скоростью 100 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение до 700 °С с четырехкратным повторением, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем высокотемпературная трехкратная ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение до 700 °С, а затем среднетемпературная трехкратная ТЦО при 700–300 °С и охлаждение на воздухе с 300 до 20 °С
ТО 5	Высокотемпературная трехкратная ТЦО в диапазоне 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение до 700 °С с двукратным повторением, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем высокотемпературная пятикратная ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение на воздухе до 20 °С
ТО 6	Высокотемпературная пятикратная ТЦО в диапазоне 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение до 700 °С с четырехкратным повторением, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем высокотемпературная пятикратная ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин, выдержка при 1050 °С 1 мин и охлаждение до 700 °С, потом среднетемпературная пятикратная ТЦО при 300–700 °С и далее охлаждение на воздухе до 20 °С
ТО 7	Среднетемпературная трехкратная ТЦО в диапазоне 300–860 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин, выдержка при 860 °С 1 мин и инерционное охлаждение до 300 °С, выдержка 1 мин при 300 °С с двукратным повторением, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем среднетемпературная трехкратная ТЦО в диапазоне 860–300 °С – нагрев со скоростью 100 °С/мин, выдержка при 860 °С 1 мин и охлаждение до 300 °С, выдержка 1 мин при 300 °С с двукратным повторением и далее охлаждение на воздухе до 20 °С
ТО 8	Среднетемпературная трехкратная ТЦО в диапазоне 300–860 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин, выдержка при 860 °С 1 мин и охлаждение инерционное до 300 °С, выдержка 1 мин при 300 °С с двукратным повторением, TIG сварка с тепловложением до 4,4 кДж/см в каждый проход, затем среднетемпературная пятикратная ТЦО в диапазоне 300–860 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин, выдержка при 860 °С 1 мин и охлаждение до 300 °С, выдержка 1 мин при 300 °С с четырехкратным повторением и далее охлаждение на воздухе до 20 °С

**Методика и оборудование
для исследований**

Образцы из труб диаметром 48,5 мм и толщиной 6,08 мм (рис. 1) подвергали нормализации в печи электрической SNOL 7,2/1300, а ТЦО проводили на установке индукционного нагрева с обратной связью ФТИ-40/10-50.

Испытание на ударный изгиб (КCU) образцов, вырезанных из трубной заготовки,

проводили на маятниковом копре PSWO 30 (СТБ ЕН 10045-1-200) после их досварочной термообработки, сварки и постсварочной термообработки (ПСТО). Образцы для определения ударной вязкости изготавливали с концентратором в ослабленной зоне. Режимы испытаний: скорость движения маятника $V_0 = 5,6$ м/с; начальная энергия маятника $E_0 = 147$ Дж; расстояние между опорами копра 40 мм.

Основные параметры разрушения определяли по следующим формулам [4–6]:

$$E_3 = E_n(1 - E_n/4E_0), \quad (1)$$

где E_n – полная энергия разрушения, Дж; E_3 – энергия зарождения трещины, Дж;

$$E_n = V_0 \int_0^t F dt, \quad (2)$$

где F – усилие, Н; t – время, мкс;

$$B = (1 - F_{xp} / F_o) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где B – волокнистая составляющая в изломе образца, %; F_{xp} – площадь хрупкого участка в изломе, мм²; F_o – общая площадь излома образца, мм²;

$$\xi = [(HV_{o,m} - HV_{o,y}) / HV_{o,m}] \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент ослабления, %; $HV_{o,m}$ – микротвердость основного металла; $HV_{o,y}$ – то же ослабленного участка в зоне термического влияния (ЗТВ).

Режимы испытаний: скорость движения маятника $V_0 = 5,6$ м/с; начальная энергия маятника $E_0 = 147$ Дж; расстояние между опорами копра 40 мм.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния режимов ПСТО на механические свойства и характер разрушения при испытании на ударный изгиб ослабленного участка, который определен методом измерения микротвердости по поверхности образца от оси шва до основного металла.

Для измерения микротвердости после сварки и термической обработки (ТО) использовали микротвердомер ПМТ-3М (нагрузка 500 г) в соответствии с методикой, изложенной в [7]. На образцах после сварки и термообработки методом фрезерования с минимальной подачей удаляли поверхностный слой металла на глубину 1 мм. Измерения проводили вдоль поверхности образца от центра шва до основного металла на длине 20 мм с шагом 1 мм. Значение микротвердости принималось среднее из пяти измерений от центра шва и по длине образца, проводимых параллельно с промежутком 1 мм.

Средний размер зерна определяли по ГОСТ 5639 на травленной поверхности микрошлифов с помощью микроскопа МИ-1Т с программным обеспечением SIAMS 800 при увеличении 200, 500 и 1000 крат. Травление осуществляли реактивом: 1 мл концентрированной азотной кислоты; 10 мл концентрированной соляной кислоты; 10 мл воды и 2,5 г двуххромовокислого калия. Способ травления – протиранием.

Изломы образцов изучали на стереометрическом микроскопе «Альтами» с десятикратным увеличением. По кривым зависимости изменения усилия разрушения во времени и кривым изменения прогиба образца в зависимости от усилия разрушения определены: энергия зарождения трещины, полная энергия разрушения, величина прогиба до разрушения образца, максимальное усилие разрушения, время до разрушения. По изломам образцов определено количество волокнистой составляющей.

Результаты исследований и их обсуждение

В работах [2, 3] исследовано изменение механических свойств (микротвердости и ударной вязкости) после различных режимов досварочной термообработки и сварки образцов из стали Р91. Результаты исследований влияния режимов досварочной ТО и сварки на распределение микротвердости по сечению сварного шва представлены кривой 1 на рис. 2. Кривая 2 на рис. 2 отражает изменение распределения микротвердости по сечению сварного шва в результате проведения постсварочной ТО по режимам, приведенным в табл. 2.

Определение микротвердости проводили по поверхности от оси шва до основного металла. Установлено значительное влияние режимов досварочной и постсварочной термообработок на тренд колебания микротвердости. Изменение микротвердости наблюдается как в сварном шве, так и по всей длине зоны термического влияния. Как показано в работе [4], при эксплуатации сварного соединения разрушение с вероятностью 95 % происходит путем образования трещин III или IV типа в ослабленном участке ЗТВ.

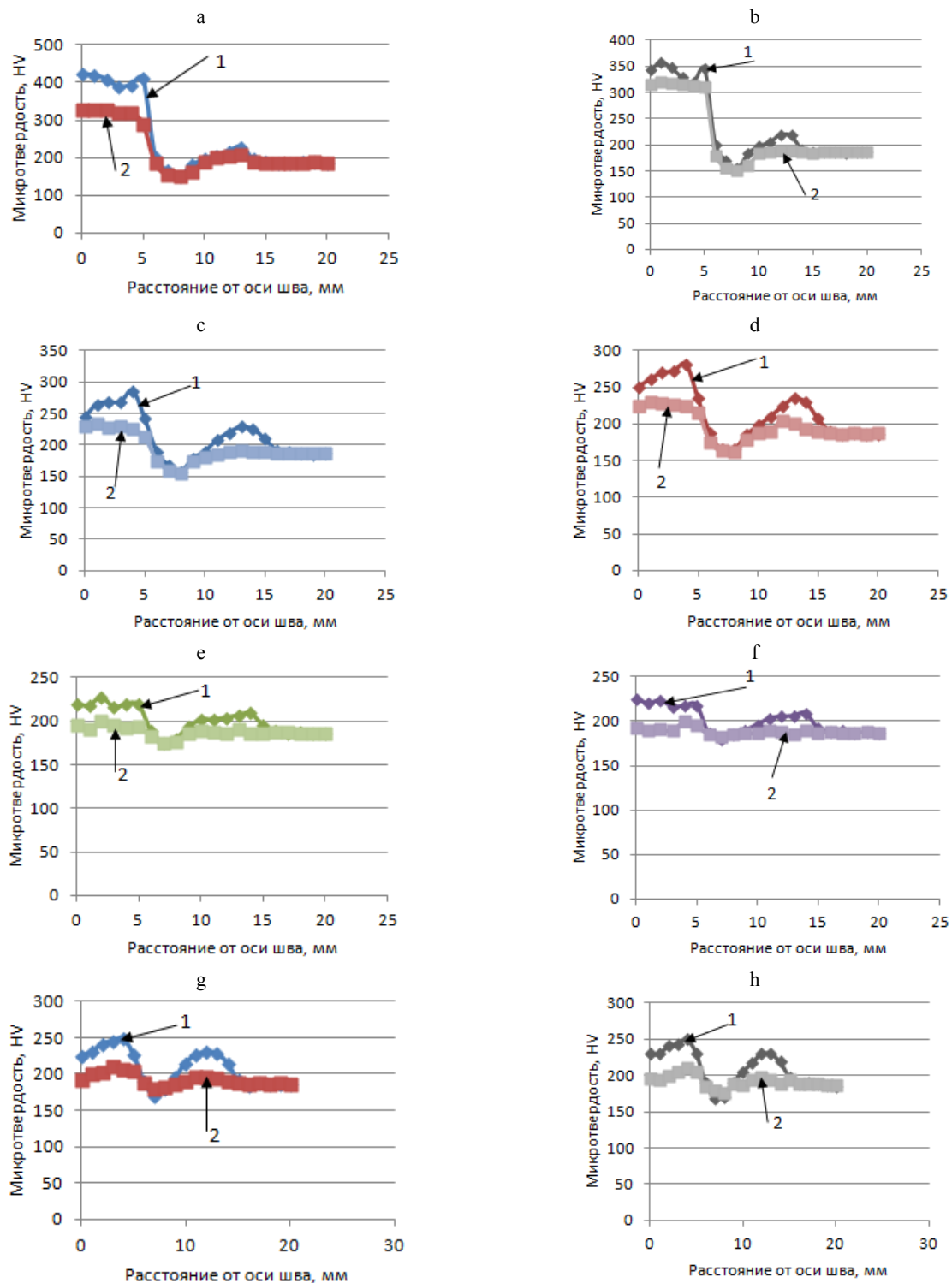


Рис. 2. Влияние постсварочной термической обработки на изменение распределения микротвердости по сечению сварного шва и зоны термического влияния: 1 – микротвердость шва и зоны термического влияния после досварочной термической обработки и сварки; 2 – то же после дополнительной постсварочной термической обработки.

Режимы термической обработки: а – 1; б – 2; в – 3; д – 4; е – 5; ф – 6; г – 7; h – 8 (табл. 2)

Fig. 2. Influence of post-weld heat treatment on the change in the distribution of microhardness over the cross-section of the weld and heat-affected zone (HAZ): 1 – microhardness of the weld and heat-affected zone after pre-weld heat treatment and welding; 2 – the same after additional pre-weld heat treatment.

Regimes of heat treatment: а – 1; б – 2; в – 3; д – 4; е – 5; ф – 6; г – 7; h – 8 (Table 2)

Размеры и расположение ослабленного участка ЗТВ соответствуют области падения микротвердости, которая располагается не в зоне роста зерна, как предполагалось ранее [2, 3], а в зоне частичной перекристаллизации.

Досварочная стандартная ТО – нормализация и высокий отпуск (табл. 2, режим ТО 1) снижают микротвердость в шве (рис. 2а), а также в ЗТВ и расширяют ослабленный участок шва.

Двойная досварочная и двойная постсварочная нормализации (режим ТО 2) способствуют снижению микротвердости в шве, а также снижению и выравниванию микротвердости в ЗТВ (рис. 2б). ТО 2 также увеличивает ослабленный участок.

Трех- и пятикратная досварочная термоциклическая обработка и трехкратная постсварочная ТЦО в диапазоне температур 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин, а также последующая трехкратная среднетемпературная ТЦО в диапазоне 700–300 °С (табл. 2, режимы ТО 3 и 4) снижают и выравнивают микротвердость в шве и в ЗТВ, но почти не влияют на размеры и микротвердость ослабленного участка ЗТВ (рис. 2с и рис. 2д).

Трехкратная досварочная и пятикратная постсварочная ТЦО в диапазоне температур 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин (табл. 2, режим ТО 5) почти выравнивают микротвердость в шве и в ЗТВ, но также не влияют на размеры и микротвердость ослабленного участка ЗТВ (рис. 2е).

Пятикратные досварочные и постсварочная ТЦО в диапазоне температур 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин с последующей пятикратной среднетемпературной ТЦО в диапазоне 700–300 °С (табл. 2, режим ТО 6) выравнивают микротвердость шва и ЗТВ и почти нивелируют ослабленный участок ЗТВ (рис. 2ф).

Трехкратные досварочные и постсварочная ТЦО в диапазоне температур 300–860 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин (табл. 2, режим ТО 7) почти выравнивают микротвердость в шве и в ЗТВ, снижают размеры и приближают микротвердость ослабленного участка ЗТВ к микротвердости основного металла (рис. 2г).

Трехкратные досварочные и пятикратная постсварочная ТЦО в диапазоне температур 300–860 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин (табл. 2, режим ТО 8) почти выравнивают значения микротвердости в шве и в ЗТВ, снижают

размеры ослабленного участка ЗТВ и приближают значения микротвердости к микротвердости основного металла (рис. 2h).

Влияние режимов досварочной термообработки, сварки и постсварочной ТО на ударную вязкость ослабленного участка в ЗТВ стали Р91 представлено на рис. 3.

После стандартной ТО – нормализации и высокого отпуска (табл. 2, режим ТО 1) значения ударной вязкости составляют 28,7 Дж/см² после сварки и 29,6 Дж/см² после последующей ПСТО, что менее чем в три раза (98 Дж/см²) по сравнению с величинами исходной ударной вязкости до сварки и после предварительной ТО.

Двойная нормализация (рис. 3, режим ТО 2) способствует получению самых низких величин ударной вязкости по сравнению с другими режимами ТО: 25,5 Дж/см² – после сварки и 27,4 Дж/см² – после последующей ПТСТО.

После трехкратной высокотемпературной ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин (рис. 3, режим ТО 3) величина ударной вязкости составляет 34,1 Дж/см², тогда как сразу после сварки 26,1 Дж/см².

Значения ударной вязкости, полученные по режиму ТО 4 (рис. 3), после сварки 35,7 Дж/см², а после трехкратной постсварочной высокотемпературной ТЦО при 700–1050 °С с последующей трехкратной среднетемпературной ТЦО при 700–300 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин составляют 45,8 Дж/см².

После пятикратной постсварочной высокотемпературной ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин (рис. 3, режим ТО 4) значение ударной вязкости составляет 46,1 Дж/см², а после сварки 36,2 Дж/см².

Режим ТО 6 (рис. 3) позволяет получить наибольшие значения ударной вязкости как после сварки (76,7 Дж/см²), так и после постсварочной ТЦО (96,8 Дж/см²) по сравнению с другими режимами ТО.

Значения ударной вязкости, полученные по режиму ТО 7 (рис. 3) следующие: после сварки 50 Дж/см², а после постсварочной ТЦО 65 Дж/см². Значения ударной вязкости, полученные по режиму ТО 8, после сварки 58,3 Дж/см², а после постсварочной ТЦО 78,5 Дж/см². Хотелось бы отметить, что постсварочная ТО по режимам 7 и 8, которая проводилась в диапазоне температур 300–860 °С, отличается только скоростью нагрева (ТО 7 – 100 °С/мин, а ТО 8 – 200 °С/мин) и количеством циклов (ТО 7 – три, а ТО 8 – пять).

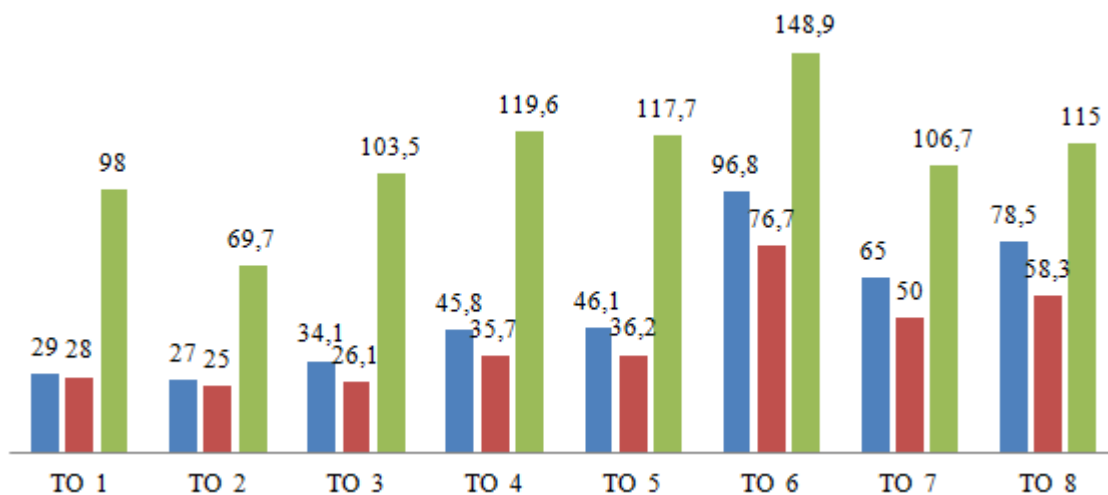


Рис. 3. Изменение ударной вязкости в зависимости от режима термической обработки (табл. 2):

■ – ударная вязкость после досварочной термической обработки; ■ – то же после сварки;
■ – то же после постсварочной термообработки

Fig. 3. Change of impact toughness depending on the heat treatment regimes (Table 2):

■ – Impact toughness after pre-weld heat treatment; ■ – Impact toughness after welding;
■ – Impact toughness after post-weld heat treatment (PWHT)

На рис. 4 показано изменение среднего размера зерна: после досварочной ТО, ослабленного участка ЗТВ после сварки и ослабленного участка ЗТВ после ПСТО в зависимости от режимов ТО. Размер зерна указан в микрометрах.

Наиболее крупные зерна получены по режиму ТО 2 (табл. 2): после сварки – 105 мкм, после постсварочной ТО – 90 мкм, а наимень-

шие – по режиму ТО 6 (табл. 2): после сварки – 27 мкм, после постсварочной ТО – 22 мкм.

Полученные значения ударной вязкости и среднего размера зерна свидетельствуют о том, что стандартная постсварочная ТО (ТО 1, табл. 2) не способствует сохранению приемлемых механических свойств. Постсварочная ТО в совокупности с досварочной ТО способствует снижению среднего размера зерна и сохранению высоких значений ударной вязкости.

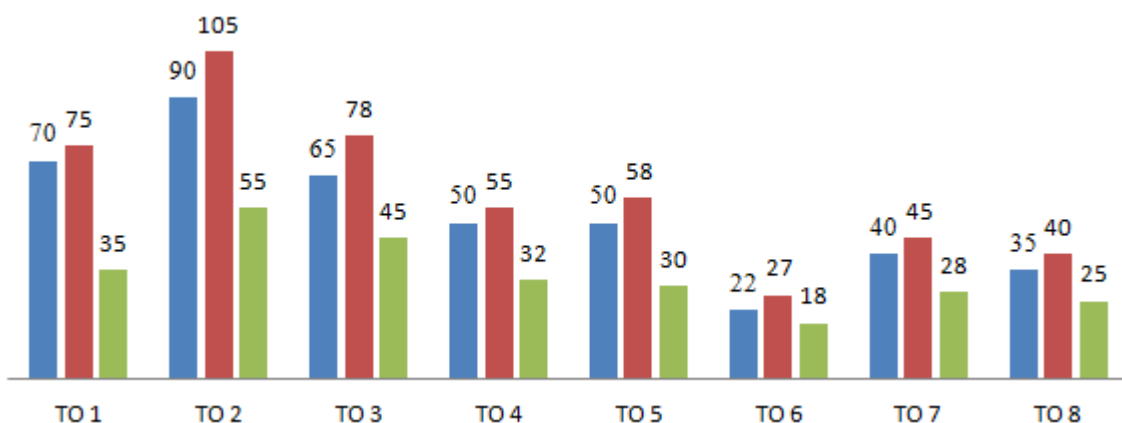


Рис. 4. Изменение среднего размера зерна в зависимости от режимов термической обработки (табл. 2):

■ – средний размер зерна после досварочной термической обработки; ■ – то же после сварки;
■ – то же после постсварочной термообработки

Fig. 4. Change of the average grain size depending on the heat treatment regimes (Table 2):

■ – Average grain size after pre-weld heat-treatment; ■ – Average grain size after welding;
■ – Average grain size after post-weld heat treatment (PWHT)

Особенно на размер зерна и ударную вязкость влияют скорость нагрева, количество циклов нагрев – охлаждение, максимальная и минимальная температуры нагрева и охлаждения при термоциклировании.

Влияние усилия разрушения на величину прогиба образца в зависимости от режима ПСТО, а также изломы образцов, полученные при испытании на ударный изгиб, показаны на рис. 5.

На рис. 6 показано влияние режимов ПСТО на основные параметры разрушения: энергию зарождения трещины, полную энергию разрушения, величину прогиба до разрушения образца, максимальное усилие разрушения, время до разрушения, усилие начала пластической деформации, конечное усилие разрушения,

коэффициент разупрочнения, количество волокнистой составляющей. Все перечисленные параметры разрушения, кроме коэффициента разупрочнения и количества волокнистой составляющей, были рассчитаны по кривым, полученным экспериментально по изменению усилия разрушения во времени, а также по изменению прогиба образца в зависимости от усилия разрушения. Расчет проводился по методике, изложенной в [2].

Постсварочная стандартная ТО (табл. 2, ТО 1), нормализация и высокий отпуск расширяют ослабленный участок, при этом коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 18,7 % (рис. 6i).

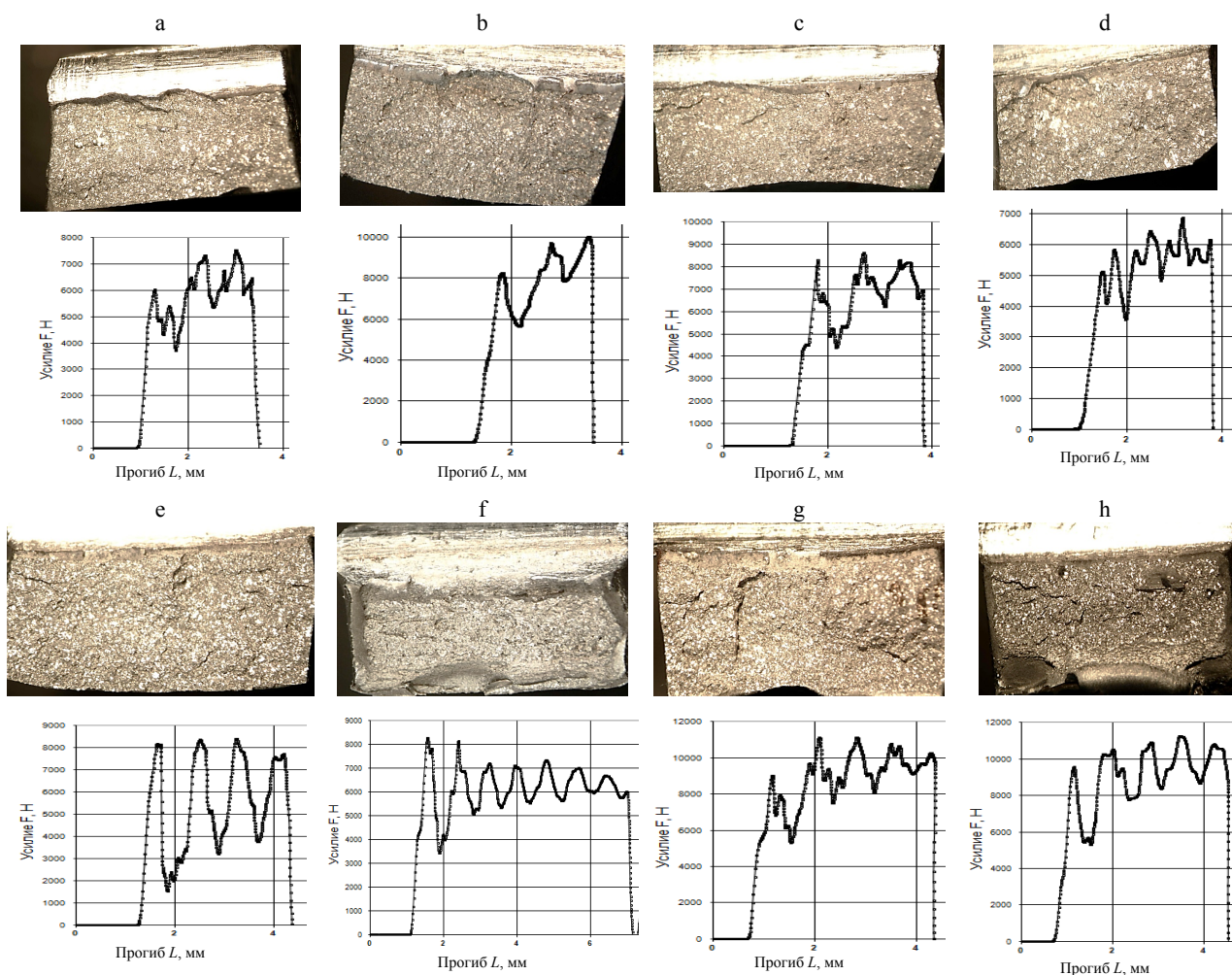


Рис. 5. Влияние усилия разрушения на величину прогиба образца в зависимости от режима постсварочной термической обработки (табл. 2), а также изломы образцов, полученные при испытании на ударный изгиб: режим термической обработки: а – 1, б – 2, в – 3, д – 4, е – 5, ф – 6, г – 7, h – 8

Fig. 5. Effect of the breaking force on the value of the deflection depending on the post-weld heat treatment regimes (Table 2), as well as the fractures of the samples obtained during the impact bending test: а – HT 1, б – HT 2, в – HT 3, д – HT 4, е – HT 5, ф – HT 6, г – HT 7, h – HT 8

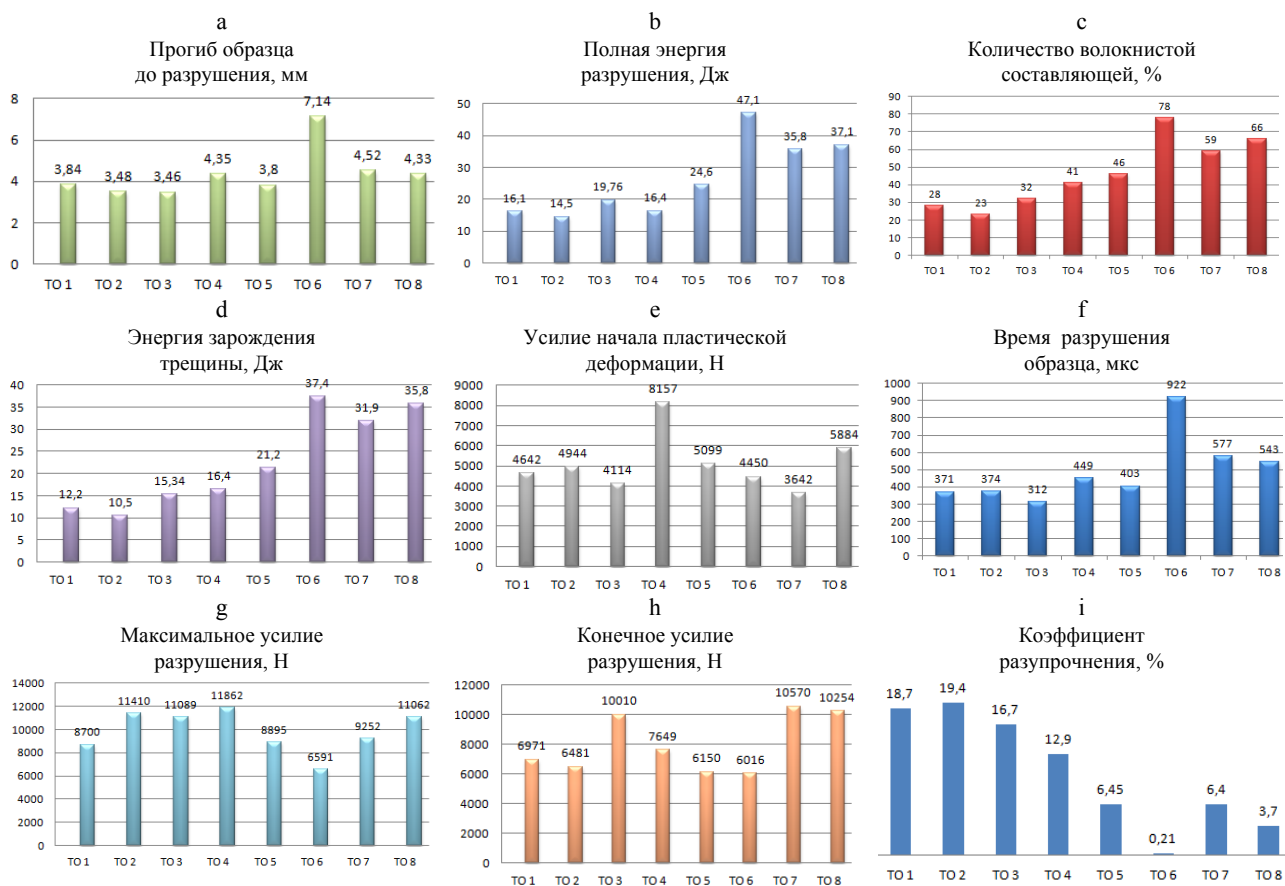


Рис. 6. Изменение характеристик разрушения в зависимости от режимов постсварочной термической обработки (табл. 2): а – величина прогиба образца до разрушения; б – полная энергия разрушения; с – количество волокнистой составляющей; d – энергия зарождения трещины; e – усилие начала пластической деформации; f – время разрушения образца; g – максимальное усилие разрушения; h – конечное усилие разрушения; i – коэффициент разупрочнения

Fig. 6. Changes of the fracture characteristics depending on the post-weld heat treatment (PWHT) regimes (Table 2): a – value of sample deflection before the fracture; b – total destruction energy; c – amount of fibrous component; d – crack initiation energy; e – force of the onset of plastic deformation; f – time of sample destruction; g – maximum force fracture; h – final fracture force; i – weakening coefficient

Кроме того, наблюдается небольшое снижение среднего размера зерна с 75 мкм после сварки до 70 мкм после ПТСО (рис. 4). Полная энергия разрушения составляет 16,1 Дж (рис. 6b) при величине прогиба образца до разрушения 3,84 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ квазихрупкий (рис. 5a) с количеством волокнистой составляющей 28 % (рис. 6c). График изменения усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через три пика с небольшими расщеплениями (рис. 5a), при этом максимальное усилие разрушения 8700 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 6971 Н (рис. 6h). Каждый подъем усилия разрушения до пика соответствует возрастанию усилия до образования трещины, а спад усилия – росту трещины до торможения, и так, пока не происходит полное разрушение испытываемого образца. Появляющиеся далее пики

после достижения усилия разрушения нулевого значения соответствуют зоне долома. Первое отклонение от линейного тренда изменения усилия разрушения во времени соответствует концу упругой деформации и является усилием начала пластической деформации. Максимальное усилие разрушения соответствует максимуму кривой. Последняя точка усилия разрушения до момента резкого спада соответствует конечному усилию разрушения и соответственно максимальному прогибу образца, после которого происходит полное разрушение образца на две половины.

Двойная досварочная нормализация, так же как и двойная постсварочная нормализация (табл. 2, ТО 2), увеличивает ослабленный участок зоны термического влияния. Коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 19,4 % (рис. 6i), а средний

размер зерна 105 мкм после сварки и 90 мкм (рис. 4) после постсварочной ТО, полная энергия разрушения 14,5 Дж (рис. 6b.), при прогибе образца до разрушения 3,48 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ квазихрупкий (рис. 5b) с количеством волокнистой составляющей 23 % (рис. 6c), а график изменения усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через три пика с заостренными концами (рис. 5b). Максимальное усилие разрушения 11410 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 6481 Н (рис. 6h).

Досварочная трехкратная ТЦО в диапазоне 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин и постсварочная трехкратная ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин (табл. 2, ТО 3) почти не влияют на размеры ослабленного участка ЗТВ (рис. 2c). Коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 16,7 % (рис. 6i), а средний размер зерна 78 мкм после сварки и 65 мкм (рис. 4) после постсварочной ТО, полная энергия разрушения составляет 19,76 Дж (рис. 6b), а прогиб образца до разрушения 3,46 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ квазихрупкий (рис. 5c) с количеством волокнистой составляющей 32 % (рис. 6c), а график изменения усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через три пика (рис. 5c). Максимальное усилие разрушения 11089 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 10010 Н (рис. 6h).

Досварочная пятикратная ТЦО в диапазоне 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин и постсварочная трехкратная ТЦО в диапазоне при 700–1050 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин, затем среднетемпературная трехкратная ТЦО в диапазоне 700–300 °С (табл. 2, ТО 4) почти не влияют на размеры ослабленного участка ЗТВ (рис. 2d).

Коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 12,9 % (рис. 6i), а средний размер зерна 55 мкм после сварки и 50 мкм (рис. 4) после постсварочной ТО, полная энергия разрушения составляет 16,4 Дж (рис. 6b), а величина прогиба образца до разрушения 4,35 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ квазихрупкий с количеством волокнистой составляющей 41 % (рис. 6c), а график изменения усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через четыре пика (рис. 5d). Максимальное усилие разрушения 11862 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 7649 Н (рис. 6h).

Досварочная трехкратная ТЦО в диапазоне 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин и постсварочная пятикратная ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин (табл. 2, ТО 5) незначительно влияют на размеры ослабленного участка ЗТВ (рис. 2e). Коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 6,45 % (рис. 6i), а средний размер зерна 58 мкм после сварки и 50 мкм (рис. 4) после постсварочной ТО, полная энергия разрушения составляет 24,5 Дж (рис. 6b), при прогибе образца до разрушения 3,8 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ квазихрупкий с количеством волокнистой составляющей 46 % (рис. 6c).

Изменение усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через четыре заостренных пика с большой амплитудой от 1500 до 8200 Н на первом пике и от 3600 до 6150 Н на четвертом (рис. 5d). Максимальное усилие разрушения 8895 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 6150 Н (рис. 6h).

Досварочная пятикратная ТЦО в диапазоне 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин и постсварочная пятикратная ТЦО при 700–1050 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин, затем среднетемпературная пятикратная ТЦО при 700–300 °С (табл. 2, ТО 6) почти устраняют ослабленный участок ЗТВ (рис. 2f). Коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 0,21 % (рис. 6i), а средний размер зерна 27 мкм после сварки и 22 мкм (рис. 4) после постсварочной ТО, полная энергия разрушения составляет 47,1 Дж (рис. 6b) при прогибе образца до разрушения 7,14 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ пластичный с количеством волокнистой составляющей 78 % (рис. 6c), изменение усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через семь пиков (рис. 5f). Максимальное усилие разрушения 6591 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 6016 Н (рис. 6h).

Досварочная трехкратная ТЦО в диапазоне 300–860 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин и постсварочная трехкратная ТЦО при 300–860 °С со скоростью нагрева 100 °С/мин (табл. 2, режим ТО 7) снижают размеры и приближают микротвердость ослабленного участка ЗТВ к микротвердости основного металла (рис. 2g). Коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 6,4 % (рис. 6i), а средний размер зерна 45 мкм после сварки и 40 мкм (рис. 4) после постсварочной ТО, полная энергия раз-

рушения составляет 35,8 Дж (рис. 6b) при прогибе образца до разрушения 4,52 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ почти пластичный с количеством волокнистой составляющей 59 % (рис. 6с), а изменение усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через пять заостренных пиков (рис. 5g). Максимальное усилие разрушения 9252 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 10570 Н (рис. 6h).

Досварочная трехкратная ТЦО в диапазоне 300–860 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин и постсварочная пятикратная ТЦО при 300–860 °С со скоростью нагрева 200 °С/мин (табл. 2, режим ТО 8) снижают размеры и приближают микротвердость ослабленного участка ЗТВ к микротвердости основного металла (рис. 2h). Коэффициент разупрочнения ослабленного участка ЗТВ составляет 3,7 % (рис. 6i), а средний размер зерна 40 мкм после сварки и 35 мкм (рис. 4) после постсварочной ТО, полная энергия разрушения составляет 37,1 Дж (рис. 6b), при прогибе образца до разрушения 4,33 мм (рис. 6a). Излом ослабленного участка ЗТВ пластичный с количеством волокнистой составляющей 59 % (рис. 6с), а график изменения усилия разрушения в зависимости от прогиба образца проходит через пять пиков (рис. 5h). Максимальное усилие разрушения 11062 Н (рис. 6g), а конечное усилие разрушения 10254 Н (рис. 6i).

Для надежной и безотказной работы сварных соединений паропроводов необходимо обеспечить максимальное равенство механических свойств шва, ЗТВ и основного металла [5].

Исследования, проведенные в рамках выполнения совместного проекта нами и китайскими коллегами из Шинь-Яньского университета показали, что структура фрагментированного субблочного безуглеродистого мартенсита, упрочненного по всему объему зерна мелкодисперсными карбидами Me_{23}C_6 , где Me – Fe, Cr, Mo и карбонитридов Nb и V наиболее стойка к крипу [8]. Вышеуказанная структура получается, как показано в работах [2, 3, 9, 10], за счет многократных скоростных фазовых превращений при ТЦО, что создает фазовый наклеп, а градиент температуры стимулирует термодиффузию [9, 10]. Основное структурное изменение при ТЦО стали P91 – сильная фрагментация (измельчение) зерна.

До- и постсварочная ТО 1 и ТО 2 (табл. 2) не обеспечивают равенства твердости шва и ЗТВ, а также не устраняют образование ослабленной зоны ЗТВ с низкой ударной вязкостью.

Вышеприведенные данные по механическим свойствам, параметрам разрушения, размеру ослабленного участка ЗТВ после до- и постсварочных ТО 3–6 (табл. 2) позволяют сделать вывод, что наиболее значимыми факторами, повышающими общую энергию разрушения, ударную вязкость и снижающими средний размер зерна, при использовании ТЦО являются скорость нагрева и количество циклов при термоциклировании. Увеличение скорости нагрева со 100 до 200 °С/мин и количества циклов в диапазоне нагрева 700–1050 °С с трех до пяти позволяет не только выровнять значения микротвердости от оси шва до основного металла, но и создать структуру с мелким зерном размером от 22 до 50 мкм, что обуславливает высокие значения ударной вязкости сварных соединений.

Режимы ТО 7 и 8 (табл. 2) показали, что не только увеличение скорости нагрева со 100 до 200 °С/мин и количества циклов с трех до пяти, но и температура нагрева при термоциклировании оказывает существенное влияние на механические свойства, параметры разрушения и размер ослабленного участка ЗТВ. Особенно, если температура нагрева при ТЦО находится между критическими точками A1 и A3 стали P91. Данное обстоятельство, по нашему мнению, способствует многократной фазовой перекристаллизации и, как следствие, созданию фазового наклепа и фрагментации структуры.

ВЫВОДЫ

1. До- и постсварочная нормализация с высоким отпуском, а также двойные до- и постсварочные нормализации не выравнивают колебание значений микротвердости в шве и зоне термического влияния и не устраняют образование ослабленной зоны с низкой ударной вязкостью.

2. Использование до- и постсварочной высокотемпературной термоциклической обработки позволяет увеличить общую энергию и время разрушения, минимизирует количество хрупкой составляющей в изломе, снижает размеры ослабленного участка зоны термического влияния.

3. Основное влияние на механические свойства и характер разрушения зоны термического влияния стали P91 при использовании термоциклической обработки оказывают скорость нагрева, его максимальная температура, а так-

же количество циклов нагрев – охлаждение. Установлено, что увеличение скорости нагрева со 100 до 200 °С/мин и количества циклов с трех до пяти при высокотемпературной термоциклической обработке позволяет повысить ударную вязкость стали P91 до 96,8 Дж/см², при этом излом становится пластичным, с долей волокнистой составляющей 78 %, при максимальном времени разрушения 922 мкс, а также с максимальной энергией зарождения трещины 37,4 Дж.

4. Установлено, что если максимальная температура нагрева при до- и постсварочной термоциклической обработке находится между критическими точками A1 и A3, то наблюдаются явления фазового наклепа и фрагментация структуры, которые существенно повышают ударную вязкость и способствуют выравниванию микротвердости в шве и зоне термического влияния, а также почти нивелируют размер ослабленного участка в ЗТВ.

Работа выполнена в рамках договора с БРФФИ № T23МЭ-027 от 02.05.2023.

ЛИТЕРАТУРА

1. Evolution of Minor Phases in a P91 Steel Normalized and Tempered at Different Temperatures / C. Hurtado-Noreña, C. A. Danón, M. I. Luppó, P. Bruzzoni // International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials, SAM-CONAMET. 2013. P. 143–146. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.172>.
2. Пантелеенко, Ф. И. Исследование механизма разрушения стали P91 на ударный изгиб после предварительной термообработки и сварки / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Зеленин, А. Л. Миньков // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 141–150. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-85-94>.
3. Пантелеенко, Ф. И. Влияние режимов предварительной термической обработки на структуру и механические свойства сварных соединений из стали P91 / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Зеленин, А. Л. Миньков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. Минск: Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, 2024. Кн. 2. С. 48–63.
4. Херцберг, Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг. М.: Металлургия, 1989. 576 с.
5. Ефименко, Л. А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений / Л. А. Ефименко, А. К. Прыгаев, О. Ю. Елагина. М.: Логос, 2007. 456 с.
6. Хромченко, Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф. А. Хромченко. М.: Машиностроение, 2002. 352 с.
7. Пантелеенко, Ф. И. Методология оценки состояния материала ответственных металлоконструкций / Ф. И. Пантелеенко, А. С. Снарский. Минск: БНТУ, 2010. 196 с.
8. Enhanced Creep Lifetime in P91 Steel Weldments via Stabilizing Tempered Martensite Structure / Z. Gu, M. Zhong, A. Minkov [et al.] // International Journal of

Pressure Vessels and Piping. 2024. Vol. 212. Art. 105361. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105361>.

9. Федюкин, В. К. Термоциклическая обработка: технология, структура и свойства металлических материалов / В. К. Федюкин. Л.: ИПМаш АН СССР, 1991. 310 с.
10. Смагоринский, М. Е. Справочник по термомеханической и термоциклической обработке металлов / М. Е. Смагоринский, А. А. Булянда, С. В. Кудряшов. СПб.: Политехника, 1992. 414 с.

Поступила 02.06.2025

Подписана в печать 07.08.2025

Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Hurtado-Noreña C., Danón C. A., Luppó M. I., Bruzzoni P. (2015) Evolution of Minor Phases in a P91 Steel Normalized and Tempered at Different Temperatures. *Procedia Materials Science*, 8, 1089–1098. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.172>.
2. Panteleenko F. I., Zelenin V. A., Minkov A. L. (2024) Research of Fracture Mechanism of Steel Grade P91 on Impact Bending After Preheat Treatment Before Welding. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (4), 85–94. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-85-94> (in Russian).
3. Panteleenko F. I., Zelenin V. A., Minkov A. L. (2024) The Influence of Preliminary Heat Treatment Regimes on the Structure and Mechanical Properties of Welded Joints Made of P91 Steel. *Sovremennye Metody i Tekhnologii Sozdaniya i Obrabotki Materialov: sb. nauch. tr. Kn. 2* [Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials Collection of Scientific Papers. Book 2]. Minsk, Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 48–63 (in Russian).
4. Herzberg R. V. (1989) *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ. 1989. 576 (in Russian).
5. Efimenko L. A., Prygaev A. K., Elagina O. Yu. (2007) *Metal Science and Heat Treatment of Welded Joints*. Moscow, Logos Publ. 456 (in Russian).
6. Khromchenko F. A. (2002) *Resource of Welded Joints of Steam Pipelines*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 352 (in Russian).
7. Panteleenko F. I., Snarsky A. S. (2010) *Methodology for Assessing the Condition of Materials of Critical Metal Structures*. Minsk, Belarusian National Technical University. 196 (in Russian).
8. Gu Z., Zhong M., Minkov A., Panteleenko F., Wang C. (2024) Enhanced creep lifetime in P91 steel weldments via stabilizing tempered martensite structure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 212, 105361. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105361>.
9. Fedyukin V. K. (1991) *Thermal Cycling: Technology, Structure and Properties of Metallic Materials*. Leningrad, Institute of Mechanical Engineering of the USSR Academy of Sciences. 310 (in Russian).
10. Smagorinsky M. E., Bulyanda A. A., Kudryashov S. V. (1992) *Handbook of Thermomechanical and Thermal Cycling Processing of Metals*. Saint Petersburg, Politekhnik Publ. 414 (in Russian).

Received: 02.06.2025

Accepted: 07.08.2025

Published online: 30.09.2025

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА DEFORMATION IN SOLID MECHANICS

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-373-382>

УДК 691.175.3

Монтажная погрешность определения модуля продольной упругости однонаправленных стеклопластиков

Докт. техн. наук, доц. В. Г. Барсуков¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Е. А. Евсеева²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет имени Янки Купалы (Гродно, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Цель работы – расчетная оценка влияния монтажной погрешности в виде эксцентриситета рабочей зоны и зоны захватов на измеряемое значение модуля продольной упругости при растяжении стержней из однонаправленных стеклопластиков. Методика исследований включала составление расчетной схемы и анализ напряженно-деформированного состояния статически неопределенного стержня, подвергнутого осевому растяжению. Радиальное смещение конца стержня с жестко заземленными краями равно монтажному эксцентриситету рабочей части относительно зоны захвата. Дополнительные осевые деформации стержня определены энергетическим методом с использованием интеграла Мора. Влиянием поперечной силы на продольные деформации стержня пренебрегали вследствие его малости. Получена аналитическая зависимость для определения продольных деформаций, обусловленных влиянием изгибающего момента от эксцентрично прикладываемого растягивающего усилия. Расчетную оценку дополнительных деформаций производили на примере стержней круглого поперечного сечения и полос прямоугольного поперечного сечения, изготовленных из однонаправленных стеклопластиков с показателями деформационных свойств, идентичными показателям арматуры стеклопластиковой номинальным диаметром 6 мм, изготовленной в соответствии с СТБ 1103–98. Показано, что для стержней с отношением длины l к диаметру d или толщине h не менее 30 дополнительные продольные деформации стержня, определяющие погрешность измерения модуля продольной упругости, не превышают 1 % во всем рассмотренном диапазоне осевых нагрузок. Более заметный вклад наблюдается для коротких стержней ($l/d = 20$) при уровне растягивающих осевых напряжений 200 МПа и менее. Результаты исследований могут быть использованы в инженерной практике и в учебном процессе при подготовке специалистов строительного и химико-технологического профиля.

Ключевые слова: однонаправленный стеклопластик, испытания, растяжение, модуль упругости, монтажная погрешность

Для цитирования: Барсуков, В. Г. Монтажная погрешность определения модуля продольной упругости однонаправленных стеклопластиков / В. Г. Барсуков, Е. А. Евсеева // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 373–382. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-373-382>

Installation Error in Determining the Longitudinal Elasticity Modulus of Unidirectional Fiberglass

V. G. Barsukov¹⁾, E. A. Evseeva²⁾

¹⁾Yanka Kupala State University of Grodno (Grodno, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of the work is to estimate the effect of installation error in the form of eccentricity of the working area and grip zone on the measured value of the longitudinal elasticity modulus under tension of rods made of unidirectional

Адрес для переписки

Евсеева Елена Анатольевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 239-93-04
vm3_ftk@bntu.by

Address for correspondence

Evseeva Elena A.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 239-93-04
vm3_ftk@bntu.by

fiberglass. The research methodology included the development of a calculation scheme and analysis of the stress-strain state of a statically indeterminate rod subjected to axial tension. The radial displacement of the end of the rod with rigidly clamped edges is equal to the installation eccentricity of the working part relative to the grip zone. Additional axial deformations of the rod are determined by the energy method using the Mohr integral. The effect of the transverse force on the longitudinal deformations of the rod was neglected due to its smallness. An analytical dependence was obtained for determining longitudinal deformations caused by the influence of the bending moment from an eccentrically applied tensile force. The calculation assessment of additional deformations was carried out using the example of rods with a circular cross-section and strips of rectangular cross-section, made of unidirectional fiberglass with deformation properties identical to those of fiberglass reinforcement with a nominal diameter of 6 mm, manufactured in accordance with СТБ [STB – Standards of the Republic of Belarus] 1103–98. It is shown that for rods with a ratio of length l to diameter d or thickness h of at least 30, additional longitudinal deformations of the rod, determining the error in measuring the modulus of longitudinal elasticity, do not exceed 1 % in the entire considered range of axial loads. A more noticeable contribution is observed for short rods ($l/d = 20$) at a level of tensile axial stresses of 200 MPa and less. The research results can be used in engineering practice and in the educational process in the training of specialists in the construction and chemical engineering profile.

Keywords: unidirectional fiberglass, testing, tension, modulus of elasticity, installation error

For citation: Barsukov V. G. Evseeva E. A. (2025) Installation Error in Determining the Longitudinal Elasticity Modulus of Unidirectional Fiberglass. *Science and Technique*. 24 (5), 373–382. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-373-382> (in Russian)

Введение

Благодаря высокой прочности и коррозионной стойкости, а также экономичности однонаправленные стеклопластики представляют значительный интерес для использования в строительстве. Опыт США и Канады [1, 2], Японии и Кореи [3, 4], ряда стран Западной и Центральной Европы [5, 6] свидетельствует о том, что композитная строительная арматура может эффективно использоваться для армирования бетонных конструкций, работающих в условиях контакта с коррозионно-активными средами при строительстве морских и речных набережных, тоннелей, подземных коммуникаций, автомобильных дорог и железнодорожных перронов, а также при производстве фундаментных плит и блоков, армировании кирпичной кладки в промышленном и гражданском строительстве. Во многих научно-технических центрах ведутся исследования и разработки, направленные на расширение номенклатуры материалов и изделий на основе стеклопластиков [7–10], в том числе с добавлением высокомодульных металлических [13, 14] и углеродных [15, 16] волокон.

Поскольку показатели физико-механических свойств стеклопластиков, приводимые в научно-технической [15–19] и справочной литературе [20–22], характеризуются широким диапазоном изменения, возникают определенные сложности при расчете и конструировании изделий. При этом, несмотря на достигнутый прогресс, многие вопросы в области испытаний стеклопластиковых стержней остаются недо-

статочно изученными. Отсутствуют единые общепринятые международные методики определения показателей механических свойств при испытаниях на растяжение, а существующие национальные методики [23–28] часто различаются по конструкции используемых анкерных систем [25–27] и длине рабочей части стержня [28]. К тому же принципиальные отличия в структуре и свойствах не позволяют переносить подходы и рекомендации, выработанные для образцов из металла и традиционных полимеров, на испытания стеклопластиковых стержней. Наряду с номинальными рабочими напряжениями и деформациями, возникающими в композитах под нагрузкой, необходим анализ дополнительных, обусловленных размерными эффектами [17], химической или термической усадкой компонентов системы [29], а также конструкцией анкерных муфт для захватов разрывной машины [25–27]. Структурно-механический анализ показывает, что различия значений коэффициентов Пуассона стеклянных волокон и полимерной матрицы влияют на измеренные показатели прочности стеклопластиков [30], но малосущественны для модуля продольной упругости и при инженерных расчетах могут не учитываться [20, 22].

Кроме того, в ряде работ [31, 32] показано, что на измеренные показатели прочности при растяжении стеклопластиков оказывает заметное влияние монтажная погрешность в виде эксцентриситета рабочей части испытываемого образца относительно зоны захватов. Так, в Российской Федерации методики испытаний однонаправленных стеклопластиков типа

арматуры приведены в ГОСТ 32492–2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик». Согласно этим методикам опытные образцы изготавливают путем свободной установки композитного стержня в испытательную анкерную муфту с последующей заливкой твердеющими полимерными материалами. Принятая в ГОСТ 32492–2015 методика испытаний аналогична рекомендациям действующей в США нормы ACI 440.3R-04 [19, 23]. Применительно к испытаниям плоских образцов в Российской Федерации действует ГОСТ Р 56785–2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов». Для испытаний применяют два типа образцов, один из которых представляет собой полосу прямоугольного сечения с закрепленными на краях накладками толщиной более 1,5 мм, при этом толщина склеивания должна быть менее 0,3 мм. Колебания толщины накладок и толщины клеевого слоя приводят к эксцентриситету рабочей зоны и зоны захватов. Однако требования к соосности рабочей части образца и зоны захвата количественно не определены. Имеется лишь общее указание о том, что при установке образца в испытательную машину следует обеспечивать точность совпадения приложения нагрузки с продольной осью образца. Аналогичная ситуация и с действующим в Республике Беларусь СТБ 1103–98 «Арматура стеклопластиковая», который распространяется на арматуру диаметром 6 мм, предназначенную для армирования предварительно напряженных бетонных конструкций.

Цель работы – расчетная оценка влияния монтажной погрешности в виде эксцентриситета рабочей зоны и зоны захватов на измеряемое значение модуля продольной упругости при растяжении однонаправленных стеклопластиков.

Методика исследований

Методика исследований включала составление расчетной схемы и анализ напряженно-деформированного состояния статически неопределенного стержня, подвергнутого осевому растяжению. Радиальное смещение конца стержня кругового поперечного сечения с жест-

ко защемленными краями и перпендикулярное к продольной оси стержня прямоугольного поперечного сечения равно монтажному эксцентриситету рабочей части относительно зоны захвата. Дополнительные осевые деформации стержня, вызывающие погрешность измерения модуля продольной упругости, определены энергетическим методом с использованием интеграла Мора. На заключительном этапе производилась оценка вклада отдельных составляющих полученной аналитической зависимости для широкого диапазона рабочих нагрузок.

Для расчетной оценки возникающих деформаций рассматривали стеклопластиковую арматуру номинальным диаметром 6 мм, для которой модуль продольной упругости согласно ГОСТ 31938–2022 и СТБ 1103–98 составляет $E = 50000$ МПа, а также полосовой профиль толщиной 3 мм с аналогичными показателями свойств. При выборе диапазона рабочих нагрузок учитывали, что СТБ 1103–98 предписывает обеспечение требований по временному сопротивлению при разрыве – не менее 1300 МПа, по нормативному сопротивлению разрыву – не менее 1200 МПа. Для арматуры по ГОСТ 31938–2022 прочность при разрыве должна быть не менее 1000 МПа. Это значение (1000 МПа) принято в качестве верхней границы диапазона номинальных напряжений.

Относительную длину l рабочей части принимали в диапазоне от 40 толщин (диаметров) стержня (образцы нормальной длины в соответствии с ГОСТ 31938–2022) до двадцати толщин (образцы укороченной вдвое длины). Эксцентриситет δ установки композитного стержня в анкерную муфту, а также эксцентриситет рабочей зоны и зоны захватов полосового профиля рассматривали в широком диапазоне от 0,2 до 1,0 мм.

Моделирование напряженно-деформированного состояния стеклопластиковых стержней и полос в процессе испытаний на растяжение

Конструктивная схема типового образца в форме полосы для испытаний в соответствии с ГОСТ Р 56785–2015 приведена на рис. 1а, в форме арматурного стержня в соответствии с ГОСТ 32492–2015 – на рис. 1б, расчетная схема для силового анализа – на рис. 1с.

На стержень, установленный в испытательных муфтах со смещением (эксцентриситетом) δ , действует растягивающее усилие F , а также возникающие в опорах A и B реакции R_{AF} , R_{BF} , M_{AF} , M_{BF} . Как известно, для плоского стержня перемещение его конца Δ может быть определено с помощью интеграла Максвелла–Мора [33]

$$\Delta = \Delta_N + \Delta_M + \Delta_Q = \int_0^l \frac{N \cdot N_1}{EA} dz + \int_0^l \frac{M_1 M_F}{EI} dz + \int_0^l \frac{\eta Q \cdot Q_1}{GA} dz, \quad (1)$$

где Δ_N , Δ_M , Δ_Q – перемещения от действия продольной силы N , изгибающего момента M и поперечной силы Q соответственно; M_1 , Q_1 , N_1 – момент, поперечная сила и продольная сила в произвольной точке стержня от действия единичной безразмерной продольной силы соответственно; E, G – модули упругости материала стержня при растяжении и сдвиге; A, I – площадь и осевой момент инерции поперечного сечения стержня; η – коэффициент, учитывающий вклад касательных напряжений от действия поперечной силы Q в деформации стержня.

Известно, что для стержней большой длины при технических расчетах вкладом поперечной силы Q в деформации стержня можно пренебречь [33], т. е. принять равным нулю последнее слагаемое в формуле (1). С достаточной для технических целей точностью деформации от внутренней продольной силы N , равной внешней растягивающей силе F , могут быть рассчитаны на основе закона Гука

$$\Delta_N \approx \frac{Nl}{EA} = \frac{Fl}{EA}. \quad (2)$$

Для нахождения второго слагаемого в формуле (1), выражающего осевые перемещения от действия изгибающего момента, учтем, что величина этого момента может быть определена из следующей аналитической зависимости [32]:

$$M_x = \frac{(e^{-\lambda l} - 1)e^{\lambda z} + (e^{\lambda l} - 1)e^{-\lambda z}}{e^{\lambda l}(\lambda - 2) - e^{-\lambda l}(\lambda + 2) + 4} F\delta, \quad (3)$$

где

$$\lambda = \sqrt{\frac{F}{EI}}. \quad (4)$$

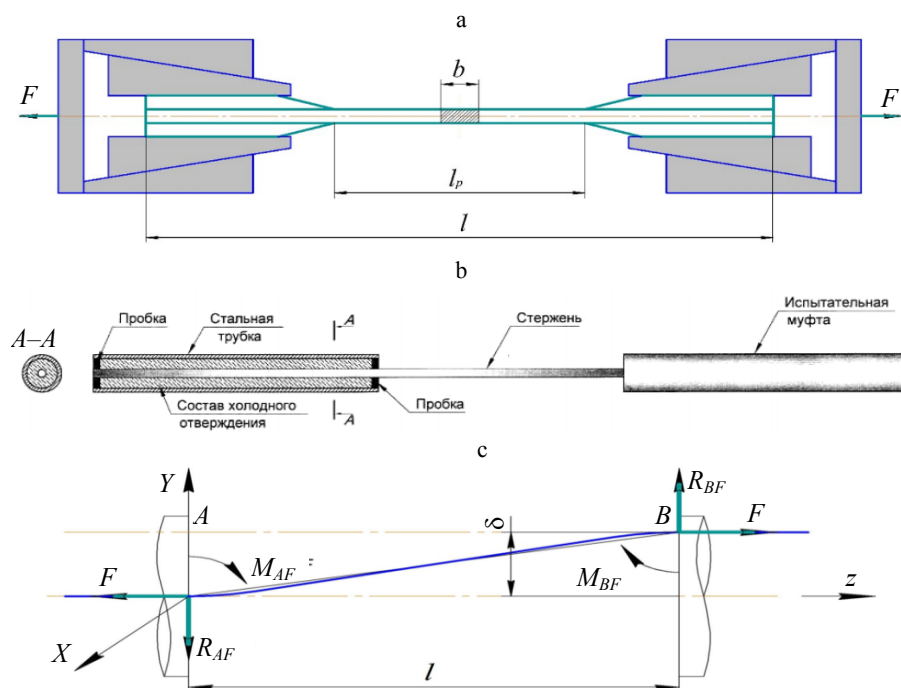


Рис. 1. Схемы плоского образца (а), арматурного стержня (б) и рабочих нагрузок (с), возникающих процессе испытаний на растяжение

Fig. 1. Schematic diagram of a flat specimen (a) and a reinforcing bar (b), as well as working loads (c) arising during tensile testing

Выразим безразмерный параметр λl , входящий в формулу (3), через номинальные напряжения σ , представляющие собой отношение усилия F к площади поперечного сечения A испытываемого стержня. Для стержня круглого поперечного сечения диаметром d [33]:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}; \quad (5a)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (5б)$$

Тогда параметр λl будет описываться следующей формулой:

$$\lambda l = \frac{4l}{d} \sqrt{\frac{\sigma_F}{E}}. \quad (5в)$$

Для полосового профиля шириной b и толщиной h [33]:

$$A = bh; \quad (6a)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}. \quad (6б)$$

В этом случае параметр λl описывается формулой

$$\lambda l = \frac{2l}{h} \sqrt{\frac{3\sigma_F}{E}}. \quad (6в)$$

Аналитическое выражение для изгибающего момента M_1 от единичной безразмерной продольной нагрузки можно получить, приняв в формуле (3) значение $F = 1$. Тогда

$$M_1 = \frac{(e^{-\lambda l} - 1)e^{\lambda z} + (e^{\lambda l} - 1)e^{-\lambda z}}{e^{\lambda l}(\lambda l - 2) - e^{-\lambda l}(\lambda l + 2) + 4} \delta. \quad (7)$$

С учетом (3) и (7) слагаемое Δ_M в интеграле Мора для осевого перемещения от действия изгибающего момента принимает вид

$$\begin{aligned} \Delta_M &= \int_0^l \frac{M_1 M_F}{EI} dz = \\ &= \frac{F \delta^2}{EI} \int_0^l \left[\frac{(e^{-\lambda l} - 1)e^{\lambda z} + (e^{\lambda l} - 1)e^{-\lambda z}}{e^{\lambda l}(\lambda l - 2) - e^{-\lambda l}(\lambda l + 2) + 4} \right]^2 dz. \end{aligned} \quad (8)$$

Интегрирование выражения (8) приводит к следующей аналитической зависимости:

$$\Delta_M = \frac{F \delta^2}{EI \lambda} \times$$

$$\times \frac{e^{2\lambda l} - 2e^{\lambda l} - e^{-\lambda l} + 2e^{-\lambda l} + 2\lambda l(2 - e^{-\lambda l} - e^{\lambda l})}{[e^{\lambda l}(\lambda l - 2) - e^{-\lambda l}(\lambda l + 2) + 4]^2}. \quad (9)$$

С целью упрощения анализа разделим числитель и знаменатель дроби в формуле (9) на величину $e^{2\lambda l}$. В итоге получим после преобразований следующее аналитическое выражение:

$$\begin{aligned} \Delta_M &= \frac{F \delta^2}{EI \lambda} \times \\ &\times \frac{1 - 2e^{-\lambda l} - e^{-4\lambda l} + 2e^{-3\lambda l} + 2\lambda l(2e^{-2\lambda l} - e^{-3\lambda l} - e^{-\lambda l})}{[(\lambda l - 2) - e^{-2\lambda l}(\lambda l + 2) + 4e^{-\lambda l}]^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Полная деформация стержня, как сумма перемещений от продольной силы и изгибающего момента, с учетом формул (2) и (10), будет описываться следующей функцией:

$$\begin{aligned} \Delta &\approx \frac{Fl}{EA} \left\{ 1 + \frac{A \delta^2}{I \lambda l} \times \right. \\ &\times \frac{1 - 2e^{-\lambda l} - e^{-4\lambda l} + 2e^{-3\lambda l} + 2\lambda l(2e^{-2\lambda l} - e^{-3\lambda l} - e^{-\lambda l})}{[(\lambda l - 2) - e^{-2\lambda l}(\lambda l + 2) + 4e^{-\lambda l}]^2} \left. \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость для расчетной оценки продольных деформаций при растяжении стержней и полос, установленных с эксцентриситетом рабочей части относительно зоны захватов. При этом стоящее в фигурных скобках после единицы второе слагаемое в виде дроби отражает дополнительные осевые перемещения, обусловленные первоначальным искривлением стержня вследствие эксцентриситета рабочей части и зоны захватов. По своему физическому смыслу оно определяет измерительную погрешность при определении модуля продольной упругости стержня.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты расчета по формулам (5в) и (6в) параметра λl , входящего в аналитические зависимости (7)–(11), для широкого диапазона номинальных напряжений σ и различных значений относительных длин рабочей части образцов приведены в табл. 1.

Изменение параметра λl в процессе испытаний
Change in parameter λl during testing

Вид образца		Параметр λl при номинальных напряжениях σ , МПа				
		200	400	600	800	1000
Полоса длиной l/h	20	5,06	7,16	8,76	10,12	11,31
	30	7,59	10,73	13,15	15,18	16,97
	40	10,12	14,31	17,53	20,24	22,63
Стержень длиной l/d	20	4,38	6,20	7,59	8,76	9,80
	30	6,57	9,30	11,38	13,15	14,70
	40	8,76	12,39	15,18	17,53	19,60

Анализ показывает, что при рассчитанных значениях λl величина $(e^{-\lambda l})$ является пренебрежимо малой в сравнении с единицей, входящей в формулы (10) и (11). Значения величин $(e^{-2\lambda l})$, $(e^{-3\lambda l})$ и $(e^{-4\lambda l})$ еще многократно меньше. Тогда, пренебрегая величинами второго и более высоких порядков малости в уравнении (9), можно получить после преобразований следующую упрощенную формулу для расчетной оценки продольных деформаций стержня, обусловленных действием изгибающего момента:

$$\Delta_M \approx \frac{F\delta^2}{EI\lambda(\lambda l - 2)^2}. \quad (12)$$

Суммарная деформация стержня с учетом (11) и (12) может быть описана аналитическим выражением

$$\Delta \approx \frac{Fl}{EA} + \frac{F\delta^2}{EI\lambda(\lambda l - 2)^2} = \frac{Fl}{EA} [1 + \psi], \quad (13)$$

где

$$\psi = \frac{A\delta^2}{I\lambda(\lambda l - 2)^2}. \quad (14)$$

Слагаемое ψ по своему физическому смыслу представляет собой дополнительную продольную деформацию стержня, обусловленную действием изгибающего момента и определяющую погрешность измерения модуля продольной упругости в сторону его уменьшения.

Используя известные формулы [33] для площади A и осевого момента инерции I , можно вычислить погрешность определения ψ продольного модуля упругости для каждого вида поперечного сечения стержня. Например, для

стержней кругового поперечного сечения диаметром d

$$\psi = \frac{16\delta^2}{d^2\lambda l(\lambda l - 2)^2}. \quad (15)$$

Для полосовых профилей прямоугольного поперечного сечения шириной b и толщиной h

$$\psi = \frac{12\delta^2}{h^2\lambda l(\lambda l - 2)^2}. \quad (16)$$

В качестве примера в табл. 2 приведены расчетные значения параметра ψ для стержня диаметром 6 мм и полосы толщиной 3 мм в широких диапазонах изменения номинальных напряжений растяжения и относительных длин рабочей части образцов.

Представленные в табл. 2 данные указывают на прогнозируемую (в процентах) погрешность измерения модуля продольной упругости стержней из однонаправленных стеклопластиков при разрыве в сторону его снижения, обусловленную вкладом изгиба стержня вследствие его радиального смещения (эксцентриситета) при установке в испытательные анкерные муфты. Видно, что для большинства типоразмеров стержней монтажная погрешность составляет менее 1 % для всех рассмотренных значений эксцентриситета δ . Только для коротких стержней с отношением длины рабочей части к толщине (диаметру), равным 20, при сравнительно низких напряжениях растяжения (около 200 МПа) погрешность превышает 1,8–2,8 % для полосового профиля толщиной 3 мм и около 1,15–1,79 % для стержней круглого поперечного сечения диаметром 6 мм. С увеличением длины образцов погрешность определения модуля продольной упругости снижается и составляет доли процента.

Таблица 2

Расчетные значения параметра ψ (%) при определении продольных деформаций
однонаправленных стеклопластиков

Calculated values of the parameter ψ (%) when determining the longitudinal deformations of unidirectional fiberglass

Вид стержня		Напряже- ние σ , МПа	Параметр ψ (%) при эксцентриситете δ , мм				
			0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Полоса длиной l/h	20	200	0,113	0,450	1,013	1,801	2,814
		400	0,021	0,112	0,252	0,448	0,699
		600	0,013	0,053	0,120	0,213	0,333
		800	0,008	0,032	0,072	0,128	0,200
		1000	0,005	0,022	0,049	0,087	0,136
	30	200	0,023	0,090	0,202	0,360	0,562
		400	0,007	0,026	0,059	0,104	0,163
		600	0,003	0,013	0,029	0,052	0,082
		800	0,002	0,008	0,018	0,032	0,051
		1000	0,001	0,006	0,013	0,022	0,035
	40	200	0,008	0,032	0,072	0,128	0,200
		400	0,003	0,010	0,022	0,039	0,062
		600	0,001	0,005	0,011	0,020	0,032
		800	0,0008	0,003	0,007	0,013	0,020
		1000	0,0006	0,002	0,005	0,009	0,014
Пруток длиной l/d	20	200	0,072	0,287	0,645	1,146	1,791
		400	0,018	0,065	0,260	0,462	0,722
		600	0,008	0,030	0,068	0,120	0,187
		800	0,004	0,018	0,040	0,071	0,111
		1000	0,003	0,012	0,027	0,048	0,075
	30	200	0,013	0,052	0,117	0,207	0,324
		400	0,004	0,014	0,032	0,057	0,090
		600	0,002	0,007	0,016	0,028	0,044
		800	0,001	0,004	0,010	0,017	0,027
		1000	0,0008	0,003	0,007	0,011	0,019
	40	200	0,004	0,009	0,040	0,071	0,111
		400	0,001	0,005	0,012	0,021	0,033
		600	0,0007	0,003	0,006	0,011	0,017
		800	0,0004	0,002	0,004	0,007	0,011
		1000	0,0003	0,001	0,003	0,005	0,007

Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. В частности, в работе [28] показано, что для трех принципиально различающихся методик экспериментального определения модуля продольной упругости стержней из однонаправленных стеклопластиков при изменении относительной длины стержней в диапазо-

не $l/d = 40-70$ не обнаружено статистически достоверного влияния l/d на измеренные значения модуля продольной упругости.

Таким образом, увеличение относительной длины l/d рабочей части стержня благоприятно сказывается на повышении точности измерений продольного модуля упругости. Однако возможно применение и коротких образцов,

но при этом необходимо обеспечить повышенную точность центрирования стержня в испытательных анкерных муфтах (эксцентриситет монтажа не должен превышать $\delta = 0,4$ мм).

ВЫВОДЫ

1. Результаты выполненных исследований позволили получить аналитические зависимости для расчетной оценки влияния погрешностей монтажа в виде эксцентриситета рабочей части композитного стержня относительно захватов на измеряемое значение модуля продольной упругости.

2. На примере арматуры стеклопластиковой номинальным диаметром 6 мм, изготовленной в соответствии со СТБ 1103–98, и стеклопластиковой полосы толщиной 3 мм показано, что для стержней с относительной длиной рабочей части не менее 30 толщин полосы или диаметров стержня вклад эксцентриситета ($\delta < 0,8–1,0$ мм) составляет менее 1 % и может не учитываться. Более заметная погрешность наблюдается для коротких образцов с относительной длиной рабочей части, равной 20 диаметрам (или толщинам полосы). При этом увеличение относительной длины l/d рабочей части стержня благоприятно сказывается на повышении точности измерений. Теоретически обосновано, что применение коротких образцов возможно при условии повышенной точности центрирования стержня в испытательных анкерных муфтах (эксцентриситет монтажа не должен превышать $\delta = 0,4$ мм).

3. Результаты исследований могут быть использованы в инженерной практике и в учебном процессе при подготовке специалистов строительного и химико-технологического профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. Detroit: American Concrete Institute (ACI), 2006. 44 p.
2. Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers: CAN/CSA-S806-02 (R2007). Canadian Standards Association, 2012. 206 p.
3. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers, 1997. 199 p. (Concrete Engineering, Series 23).
4. Development of Ductile Composite Reinforcement Bars for Concrete Structures / Yihua Cui, M. S. Moe Cheung, Bahman Noruziaan [et al.] // Materials and Structures. 2008. Vol. 41. P. 1509–1518. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9344-8>.
5. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars: CNR-DT 203/2006. Rome: Italian National Research Council (CNR), 2006. URL: https://site2.soyka.by/wp-content/uploads/2025/02/cnr-dt_203_2006.pdf.
6. Jarek, B. Zastosowanie Prętów Zbrojeniowych z Włókna Szklanego (GFRP) w Budownictwie / B. Jarek, A. Kubik // Przegląd Budowlany. 2015. No 012. P. 21–26.
7. Dems, K. Modeling of Fiber Reinforced Composite Materials Subjected to Thermal Load / K. Dems, E. Radaszewska, J. Turant // Journal of Thermal Stresses. 2012. Vol. 35, No 7. P. 579–595. <https://doi.org/10.1080/01495739.2012.674786>.
8. Okutan, B. The Failure Strength for Pin-Loaded Multi-directional Fiber-Glass Reinforced Epoxy Laminate / B. Okutan, R. Karakuzu // Journal of Composite Materials. 2002. Vol. 36, No 24. P. 2695–2712. <https://doi.org/10.1177/002199802761675502>.
9. Aktas, A. Failure Analysis of Two Dimensional Carbon-Epoxy Composite Plate Pinned Joint / A. Aktas, R. Karakuzu // Mechanics of Composite Material Structures. 1999. Vol. 6, No 4. P. 347–361. <https://doi.org/10.1080/107594199305502>.
10. Malvar, L. J. Tensile and Bond Properties of GFRP Reinforcing Bars / L. J. Malvar // ACI Materials Journal. 1995. Vol. 92, No 3. P. 276–285. <https://doi.org/10.14359/1120>.
11. Sun, Z. Mechanical Properties of Steel-FRP Composite Bar under Tensile and Compressive Loading / Z. Sun, Y. Tang, Y. Luo, G. Wu, X. He // International Journal of Polymer Sciences. 2017, 03 January. <https://doi.org/10.1155/2017/5691278>.
12. Experimental Investigation for Tensile Performance of FFRP-Steel Hybridized Rebar / Dong-Woo Seo, Ki-Tae Park, Young-Jun You, Sang-Yoon Lee // Advances in Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 2016. Art. 9401427. <https://doi.org/10.1155/2016/9401427>.
13. Experimental Bond Behavior of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement / A. A. Nanni, J. S. Nenniger, K. D. Ash, J. Liu // Structural Engineering and Mechanics. 1997. Vol. 5, No 4. P. 339–353. <https://doi.org/10.12989/sem.1997.5.4.339>.
14. Hybrid Effect on Tensile Properties of FRP Rods with Various Material Compositions / Y.-J. You, Y.-H. Park, H. Kim, J. S. Park // Composite Structures. 2007. Vol. 80, No 1. P. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.065>.
15. Bakis, C. E. Self-Monitoring, Pseudo-Ductile, Hybrid FRP Reinforcement Rods for Concrete Applications / C. E. Bakis, A. Nanni, J. A. Terosky // Composites Science and Technology. 2001, Vol. 61, No 6. P. 815–823. [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(00\)00184-6](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(00)00184-6).
16. Kretsis, G. A Review of the Tensile, Compressive, Flexural, and Shear Properties of Hybrid Fiber-Reinforced

- Plastics / G. Kretsis // Composites. 1987. Vol. 18, No 1. P. 13–23. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(87\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0010-4361(87)90003-6).
17. Okutan, B. A Study of the Effects of Various Geometric Parameters on the Failure Strength of Pin-Loaded Woven-Glass-Fiber Reinforced Epoxy Laminate / B. Okutan, Z. Aslan, R. Karakuzu // Composite Science and Technology. 2001. Vol. 61. P. 1491–1497. [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(01\)00043-4](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(01)00043-4).
 18. Comparison of Mechanical Behavior of Carbon and Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites / N. Oszoy, A. Mimaroglu, M. Oszoy, M. I. Oszoy // Acta Physica Polonica A. 2015. Vol. 127, No 4. P. 1032–1034. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.127.1032>.
 19. Особенности испытаний и характер разрушения полимеркомпозитной арматуры / А. Р. Гидзатулин, В. Г. Хозин, А. Н. Куклин, А. М. Хуснутдинов // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3. С. 40–50.
 20. Matthews, F. L. Composite Materials: Engineering and Science / F. L. Matthews, R. D. Rawlings. Woodhead Publishing, 1999. 470 p.
 21. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Панаматченко, Ю. В. Крыжановская. СПб.: Профессия, 2005. 248 с.
 22. Композиционные материалы: справ. / Л. Р. Вишняков, Т. В. Грудина, В. Х. Кадыров [и др.]; под ред. Д. М. Карпиноса. Киев: Наук. думка, 1985. 592 с.
 23. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing of Strengthening Concrete Structures: Detroit: American Concrete Institute (ACI), 2004. 40 p.
 24. Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod: ASTM D 3916. West Conshohocken, Pa. ASTM, 1996. 6 p.
 25. Erki, M. A. Anchorages for FRP Reinforcement / M. A. Erki, S. H. Rizkalla // Concrete International. 1993. Vol. 15, No 6. P. 54–59.
 26. Al-Mayah, A. Novel Anchor System for CFRP Rod. Finite – Element and Mathematical Models / A. Al-Mayah, K. Soudki, A. A. Plumtree // Journal of Composites for Construction. 2007, Vol. 11, No 5. P. 469–476. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2007\)11:5\(469\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:5(469)).
 27. Carvelli, V. Anchor System for Tension Testing of Large Diameter GFRP Bars / V. Carvelli, G. Fava, M. Pisani // Journal of Composites for Construction. 2009. No 13. P. 344–349. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jcc.1943-5614.0000027](https://doi.org/10.1061/(asce)jcc.1943-5614.0000027).
 28. Castro, P. F. Tensile and Nondestructive Testing of FRP Bars / P. F. Castro, N. J. Carino // Journal of Composites for Construction. 1998. Vol. 2, No 1. P. 17–27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(1998\)2:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(1998)2:1(17)).
 29. Василевич, Ю. В. Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита / Ю. В. Василевич, К. А. Горелый, С. В. Сахоненко, С. Н. Иванов // Теоретическая и прикладная механика: Междунар. науч.-техн. сб. Минск: БНТУ. Вып. 31. 2016. С. 67–72.
 30. Барсуков, В. Г. Напряжения в композитной строительной арматуре, обусловленные различиями коэффициентов Пуассона / В. Г. Барсуков, А. Г. Лежава, Е. А. Евсеева // Наука и техника. 2025. Т. 24, № 2. С. 124–133. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-124-133>.
 31. Барсуков, В. Г. Напряжения при разрыве композитной арматуры, установленной эксцентрично в испытательных муфтах / В. Г. Барсуков, А. Г. Лежава // Известия вузов. Строительство. 2024. № 8. С. 133–143. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-788-8-133-143>.
 32. Барсуков, В. Г. Особенности напряженного состояния композитной арматуры при испытаниях на разрыв / В. Г. Барсуков, А. Г. Лежава, Е. А. Евсеева // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 6. С. 492–499. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-492-499>.
 33. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев; отв. ред. Г. С. Писаренко. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.

Поступила 20.05.2025

Подписана в печать 24.07.2025

Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. ACI 440.1R-06. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. Detroit, American Concrete Institute (ACI), 2006. 44 p.
2. CAN/CSA-S806-02 (R2007). *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. Canadian Standards Association, 2012. 206 p.
3. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*. Concrete Engineering, Series 23. Tokyo, JSCE, 1997. 199 p.
4. Cui Y., Cheung M. M. S., Noruziaan B., Lee S., Tao J. (2008) Development of Ductile Composite Reinforcement Bars for Concrete Structures. *Materials and Structures*, 41 (9), 1509–1518. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9344-8>.
5. CNR-DT 203/2006. *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Rome, Italian National Research Council (CNR), 2006. Available at: https://site2.soyka.by/wp-content/uploads/2025/02/cnr-dt_203_2006.pdf.
6. Jarek B., Kubik A. (2015) Zastosowanie Prętów Zbrojeniowych z Włókna Szklanego (GFRP) w Budownictwie. *Przegląd Budowlany*, (012), 21–26.
7. Dems K., Radaszewska E., Turant J. (2012) Modeling of Fiber-Reinforced Composite Material Subjected to Thermal Load. *Journal of Thermal Stresses*, 35 (7), 579–595. <https://doi.org/10.1080/01495739.2012.674786>.
8. Okutan B., Karakuzu R. (2002) The Failure Strength for Pin-Loaded Multi-Directional Fiber-Glass Reinforced Epoxy Laminate. *Journal of Composite Materials*, 36 (24), 2695–2712. <https://doi.org/10.1177/002199802761675502>.
9. Aktas A., Karakuzu R. (1999) Failure Analysis of Two-Dimensional Carbon-Epoxy Composite Plate Pinned Joint. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 6 (4), 347–361. <https://doi.org/10.1080/107594199305502>.

10. Malvar L. J. (1995) Tensile and Bond Properties of GFRP Reinforcing Bars. *ACI Materials Journal*, 92 (3). <https://doi.org/10.14359/1120>.
11. Sun Z., Tang Y., Luo Y., Wu G., He X. (2017) Mechanical Properties of Steel-FRP Composite Bars under Tensile and Compressive Loading. *International Journal of Polymer Science*, 2017, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/5691278>.
12. Seo D.-W., Park K.-T., You Y.-J., Lee S.-Y. (2016) Experimental Investigation for Tensile Performance of GFRP-Steel Hybridized Rebar. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2016/9401427>.
13. Nanni A., Nemninger J. S., Ash K. D., Liu J. (1997). Experimental Bond Behavior of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement. *Structural Engineering and Mechanics*, 5 (4), 339–353. <https://doi.org/10.12989/sem.1997.5.4.339>.
14. You Y.-J., Park Y.-H., Kim H.-Y., Park J.-S. (2007) Hybrid Effect on Tensile Properties of FRP Rods with Various Material Compositions. *Composite Structures*, 80(1), 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.065>.
15. Bakis C. E., Nanni A., Terosky J. A., Koehler S. W. (2001) Self-Monitoring, Pseudo-Ductile, Hybrid FRP Reinforcement Rods for Concrete Applications. *Composites Science and Technology*, 61(6), 815–823. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00184-6).
16. Kretsis G. (1987) A review of the Tensile, Compressive, Flexural and shear Properties of Hybrid Fibre-Reinforced Plastics. *Composites*, 18 (1), 13–23. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(87\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0010-4361(87)90003-6).
17. Okutan B., Aslan Z., Karakuzu R. (2001) A study of the Effects of various Geometric Parameters on the Failure Strength of Pin-Loaded Woven-Glass-Fiber Reinforced Epoxy Laminate. *Composites Science and Technology*, 61 (10), 1491–1497. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00043-4).
18. Ozsoy N., Mimaroglu A., Ozsoy M., Ozsoy M. I. (2015) Comparison of Mechanical Behaviour of Carbon and Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Acta Physica Polonica A*, 127 (4), 1032–1034. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.127.1032>.
19. Gidzatuln A. R., Khozin V. G., Kuklin A. N., Khusnutdinov A. M. (2014) Features of Testing and the Nature of Destruction of Polymer-Composite Reinforcement. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, (3), 40–50 (in Russian).
20. Matthews F. L., Rawlings R. D. (1999) *Composite Materials: Engineering and Science*. Woodhead Publishing, 1999. 470.
21. Kryzhanovskiy V. K., Burlov V. V., Panimatchenko A. D., Kryzhanovskaya Yu. V. (2005) *Technical Properties of Polymeric Materials: Training and Reference Manual*. Saint Petersburg, Professiya Publ. 248 (in Russian).
22. Vishnyakov L. R., Grudina T. V., Kadyrov V. Kh., Karpinos D. M., Oleinik V. I., Sapozhnikova A. B., Tuchinskii L. I. (1985) *Composite Materials: Handbook*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 592 (in Russian).
23. ACI 440.3R-04. *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing of Strengthening Concrete Structures*. Detroit, American Concrete Institute (ACI), 2004. 40.
24. ASTM D 3916. *Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod*. – West Conshohocken, Pa. ASTM, 1996. 6.
25. Erki, M. A., Rizkalla S. H. (1993) Anchorages for FRP Reinforcement. *Concrete International*, 15 (6), 54–59.
26. Al-Mayah A., Soudki K., Plumtree A. (2007) Novel Anchor System for CFRP Rod: Finite-Element and Mathematical Models. *Journal of Composites for Construction*, 11 (5), 469–476. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2007\)11:5\(469\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:5(469)).
27. Carvelli V., Fava G., Pisani M. A. (2009). Anchor System for Tension Testing of Large Diameter GFRP Bars. *Journal of Composites for Construction*, 13 (5), 344–349. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000027](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000027).
28. Castro P. F., Carino N. J. (1998) Tensile and Nondestructive Testing of FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*, 2 (1), 17–27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(1998\)2:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(1998)2:1(17)).
29. Vasilevich Yu. V., Gorely K. A., Sakhonenko S. V., Ivanov S. N. (2016) The Influence of Chemical Shrinkage of the Binder during Curing on the formation of Residual Stresses in Cylindrical Composite Shells. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Mekhanika: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb.* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk: BNTU, Iss. 31, 67–72 (in Russian).
30. Barsukov V. G., Lezhava A. G., Evseeva E. A. (2025) Stresses in Composite Building Reinforcement due to Differences in Poisson's Ratios. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 24 (2), 124–133. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-124-133> (in Russian).
31. Barsukov V. G., Lezhava A. G. (2024) Tensile Stresses of Composite Reinforcement Installed Eccentrically in Test Couplings. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (8), 133–143. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-788-8-133-143> (in Russian).
32. Barsukov V. G., Lezhava A. G., Evseeva E. A. (2024) Features of the Stress State of Composite Reinforcement during Tensile Tests. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23 (6), 492–499. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-492-499> (in Russian).
33. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. (1988) *Handbook of Strength of Materials*. 2nd Ed. Kiev, Naukova Dumka Publ. 736 (in Russian).

Received: 20.05.2025

Accepted: 24.07.2025

Published online: 30.09.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-383-392>

УДК 681.7.032.72

Формализация исполнительного механизма технологического оборудования для обработки линз с тонким центром

Докт. техн. наук, проф. **А. С. Козерук¹⁾**, инж. **В. В. Сафонов²⁾**,
кандидаты техн. наук, доценты **В. И. Юринок¹⁾**, **М. И. Филонова¹⁾**, **В. О. Кузнецик¹⁾**

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Унитарное предприятие «НТЦ “ЛЭМТ” БелОМО»

Реферат. При обработке оптических деталей, в том числе линз, используют метод силового замыкания, который отличается от геометрического замыкания, применяемого в механообработке, тем, что в нем инструмент самопроизвольно устанавливается по детали и совершает сложное перемещение по ее исполнительной поверхности, состоящее из относительного и переносного движений. Изложена принципиальная конструкция технологического оборудования для параллельного формообразования исполнительных поверхностей линз в условиях силового замыкания при непрерывном направлении рабочего усилия по нормали к обрабатываемым сферическим поверхностям детали и при постоянном его значении в процессе возвратно-вращательных движений инструментов, обусловленном наличием в конструкции оборудования механизмов регулирования величины усилия прижима инструментов к заготовке детали посредством изменения угла наклона рабочих элементов этих механизмов. Представлены результаты определения скорости съема припуска с исполнительной поверхности линзы при направлении силы прижима инструмента по вертикали и по радиусу кривизны детали. Выполнена формализация геометрических связей исполнительного механизма технологического оборудования. Получены формулы для расчета длины входного звена исполнительного механизма, обеспечивающей необходимую амплитуду переносного движения его выходного звена, и для определения линейной скорости инструмента в его возвратно-вращательном перемещении по обрабатываемой поверхности линзы. Проведены экспериментальные исследования процесса финишной обработки линз по классической схеме, когда усилие прижима инструмента в процессе его возвратно-вращательного перемещения по исполнительной поверхности детали направлено по вертикали, и по схеме, когда это усилие совпадает с нормалью к сферической поверхности детали. В результате выявлено повышение производительности и качества обработки в среднем на 15 и 30 % соответственно.

Ключевые слова: технологическое оборудование, исполнительный механизм, рабочее усилие, линзы с тонким центром, двустороннее формообразование

Для цитирования: Формализация исполнительного механизма технологического оборудования для обработки линз с тонким центром / А. С. Козерук [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 383–392. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-383-392>

Formalization of the Actuator Mechanism of the Technological Equipment for Processing Lenses with a Thin Center

A. S. Kozeruk¹⁾, **V. V. Safonov²⁾**, **V. I. Yurinok¹⁾**, **M. I. Filonova¹⁾**, **V. O. Kuznechik¹⁾**

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾NTTs “LEMT” BelOMO – Scientific and Technical Center “Lasers in Ecology, Medicine, Technology”
Belarusian Optical and Mechanical Organization (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. When processing optical parts, including lenses, a force-locking method is used, which differs from the geometric locking used in mechanical processing in that the tool is spontaneously positioned on the part and performs a complex

Адрес для переписки

Филонова Марина Игоревна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-74-91
kippp@bntu.by

Address for correspondence

Filonova Marina I.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-74-91
kippp@bntu.by

movement along its working surface, consisting of relative and translational methods. The fundamental design of technological equipment for parallel shaping of the actuator surfaces of lenses under conditions of force closure with continuous direction of the working force along the normal to the processed spherical surfaces of the part and with its constant value in the process of reciprocating rotational movements of the tools, due to the presence in the equipment design of mechanisms for regulating the magnitude of the force pressing the tools to the workpiece by changing the angle of inclination of the working elements of these mechanisms is presented in the paper. The results of determining the rate of removal of the allowance from the working surface of the lens are presented when the tool pressing force is directed vertically and along the radius of curvature of the part. The geometrical relationships of the actuator of the technological equipment have been formalized. Formulas have been obtained for calculating the length of the input link of the actuator, providing the necessary amplitude of the translational movement of its output link, and for determining the linear speed of the tool in its reciprocating-rotational movement along the processed surface of the lens. Experimental studies have been conducted on the process of finishing lenses using the classical scheme, when the pressing force of the tool during its reciprocating-rotational movement along the working surface of the part is directed vertically, and according to the scheme, when this force coincides with the normal to the spherical surface of the part. As a result, an increase in productivity and quality of processing by an average of 15 and 30 %, respectively has been revealed.

Keywords: technological equipment, actuator, working force, lenses with a thin center, two-sided shaping

For citation: Kozeruk A. S., Safonov V. V., Yurinok V. I., Filonova M. I., Kuznechik V. O. (2025) Formalization of the Actuator Mechanism of the Technological Equipment for Processing Lenses with a Thin Center. *Science and Technique*. 24 (5), 383–392. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-383-392>

Введение

При обработке оптических деталей, в том числе линз, используют метод силового замыкания, который отличается от геометрического замыкания, применяемого в механообработке, тем, что в нем инструмент самопроизвольно устанавливается по детали и совершает сложное перемещение по ее исполнительной поверхности, состоящее из относительного и переносного движений. При этом используются так называемые рычажные станки, обеспечивающие шарнирное соединение их выходного звена с инструментом, что позволяет последнему самоустанавливаться по обрабатываемой сферической поверхности заготовки детали в случае ее возможных наклонов в процессе обработки, способствуя тем самым повышению параметров точности формообразования. Однако эти параметры несколько ухудшаются за счет крепления линз на специальные приспособления в виде гриба или чашки посредством наклеечной смолы, которая вызывает в заготовках упругие деформации, искажающие точно обработанную поверхность детали после ее разблокировки. Отмеченных деформаций можно избежать в случае крепления линз за их боковую цилиндрическую поверхность [1]. И поскольку при этом освобождаются от наклеечного вещества обе исполнительные поверхности деталей, представляется возможность реализовать одновременную двустороннюю их обработку.

Технологическое оборудование для формообразования линз с тонким центром

Работа технологического оборудования для двусторонней обработки оптических деталей со сферическими поверхностями, кинематическая схема которого приведена на рис. 1 [2], сводится к следующему. Закрепив линзу 7 с помощью фотополимерной смолы в сепараторе 6 за цилиндрическую поверхность, на ее выпуклую и вогнутую поверхности помещают обрабатывающие соответственно вогнутый 10 и выпуклый 8 инструменты. После этого по формуле

$$\alpha = 64,15 - 36,1\lambda, \quad (1)$$

где λ – отношение диаметров инструментов 8 и 10 к диаметру линзы 7, которое может изменяться в пределах от 0,7 до 0,9 в зависимости от характера распределения по исполнительным поверхностям А и Б линзы 7 подлежащего удалению припуска, определяют углы наклона α_A и α_B рабочего элемента копира 38, 39, при которых обеспечивается постоянное значение давления в непрерывно изменяющейся по величине площади контакта обрабатываемых поверхностей линзы 7 с вогнутым 10 и выпуклым 8 инструментами в процессе возвратно-вращательного перемещения последних, осевыми смещениями П-образного кронштейна 36, 37 вдоль оси полого цилиндра 46, 47 и стержня 40, 41 с копиром 38, 39 вдоль оси полого цилиндра 42, 43 добиваются необходимого значения

исходного рабочего усилия инструментов 10, 8 на поверхности А, Б линзы 7 при их полном соприкосновении, зажимают стопорные винты 48, 49 и 50, 51 и последовательно включают электродвигатели 4, 30, 31, 9, 11, крутящие моменты которых через соответствующие звенья технологического оборудования (рис. 1) вызывают относительное и переносное движения инструментов 8, 10 по обрабатываемой линзе.

При возвратно-вращательном перемещении штанги 24, 25 происходит возвратно-вращательное движение тарированной пружины 32, 33, П-образного кронштейна 36, 37, замыкающей пружины 34, 35 и полого цилиндра 46, 47 вокруг оси симметрии неподвижного кронштейна 44, 45, проходящей через центр кривизны C_A , C_B поверхности А, Б линзы 7.

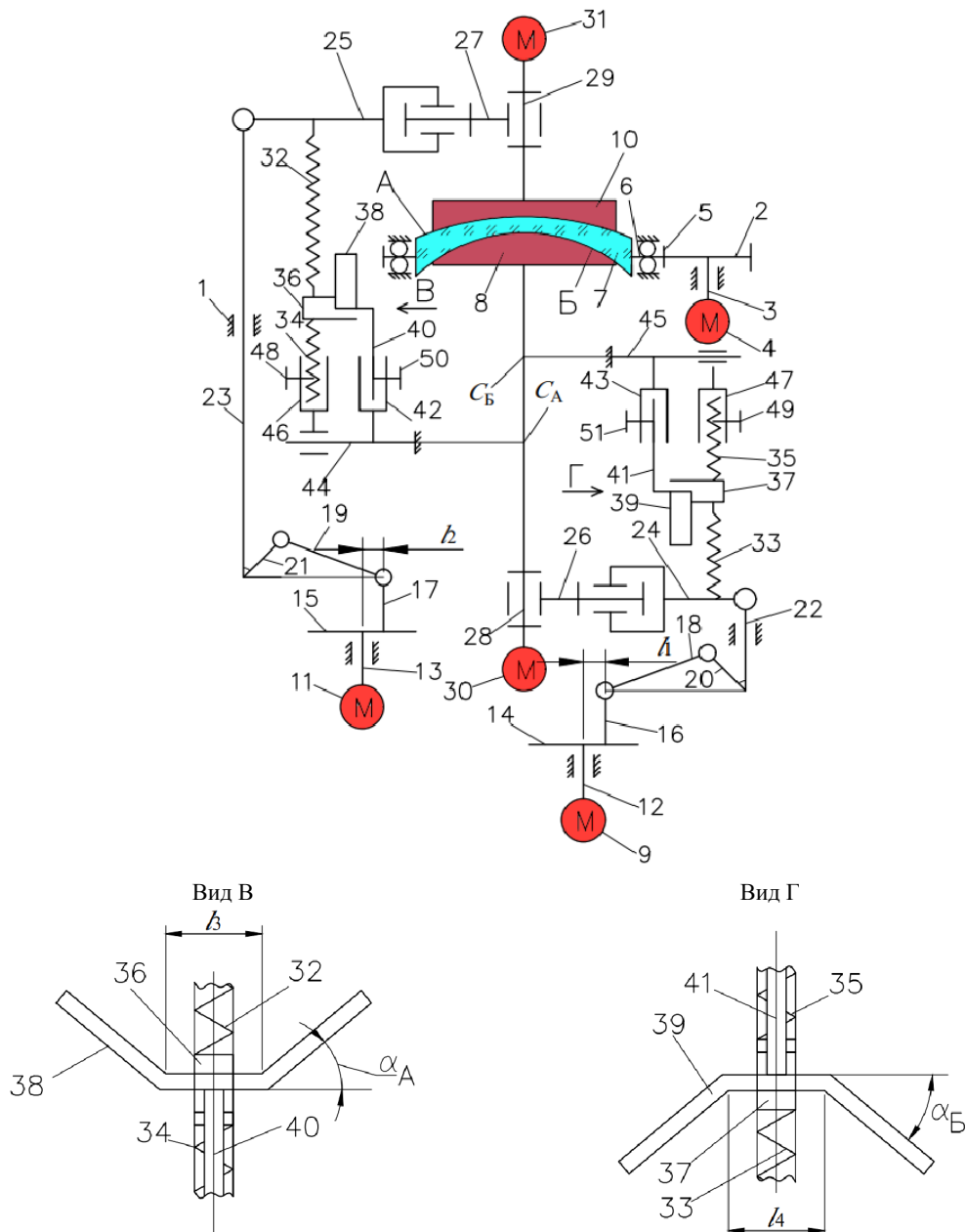


Рис. 1. Принципиальная кинематическая схема технологического оборудования для двустороннего формообразования линз с тонким центром

Fig. 1. Schematic diagram of the process equipment for two-sided shaping of thin-center lenses

Вследствие этого развиваемое тарированной пружиной исходное рабочее усилие постоянно направлено по нормали к обрабатываемым поверхностям линзы. И поскольку при этом копир 38, 39, рычаг 40, 44 и полый цилиндр 46, 47 находятся в неподвижном состоянии, одна из полок П-образного кронштейна 36, 37 скользит по рабочему элементу копира 38, 39. При начальном возвратно-вращательном перемещении штанги 24, 25 перемещение П-образного кронштейна происходит в пределах горизонтального участка рабочего элемента копиров длиной $l_3 = d_{\text{л}} - d_{\text{в}}$; $l_4 = d_{\text{л}} - d_{\text{н}}$, где $d_{\text{л}}$ – диаметр линзы, $d_{\text{в}}$ и $d_{\text{н}}$ – диаметры верхнего и нижнего инструментов соответственно, благодаря чему длина тарированной пружины 32, 33 не изменяется и исходное рабочее усилие на исполнительные поверхности линзы 7 остается постоянным. При дальнейшем увеличении амплитуды возвратно-вращательного перемещения штанги 24, 25 П-образный кронштейн 36, 37 начинает перемещаться по наклонному участку рабочего элемента копира 38, 39, что приводит к уменьшению длины тарированной пружины 32, 33 и, следовательно, к уменьшению исходного рабочего усилия на величину, пропорциональную текущей площади соприкосновения инструментов 10, 8 с поверхностями А, Б линзы 7. При уменьшении амплитуды возвратно-вращательного перемещения штанги 24, 25 вместе с тарированной пружиной 32, 33, П-образным кронштейном 36, 37, замыкающей пружиной 34, 35 и полым цилиндром 46, 47 под действием замыкающей пружины длина тарированной пружины увеличивается, вызывая повышение рабочего усилия на инструменты 10, 8 пропорционально увеличению площади их соприкосновения с исполнительными поверхностями линзы 7. Отмеченное обеспечивает неизменное значение удельного давления в зоне контакта инструментов с линзой в пределах рабочего цикла.

В процессе доводки геометрической точности сферических поверхностей линзы (точности радиусов кривизны) выполняют соответствующие регулирования (в зависимости от технологической наследственности заготовки линзы, т. е. от характера распределения по ее обрабатываемой поверхности подлежащего удалению припуска) наладочных параметров технологического оборудования, в частности скорости

вращения инструментов и величины амплитуды их колебательного движения, а также значения рабочего усилия на инструменты и скорости вращения линзы.

В предлагаемой конструкции технологического оборудования для обработки линз с тонким центром основным механизмом является шарнирный четырехзвенник, содержащий звенья 14 и 15, 18 и 19, 20 и 21, причем кривошип 14, 15 относится к ведущему (входному) звену [3]. И если известен угол поворота φ_2 этого звена, т. е. закон его движения в виде функции $\varphi_2 = \varphi_2(t)$, тем самым можно определить положение остальных звеньев шарнирного четырехзвенника в произвольно выбранный момент времени t .

В процессе работы четырехзвенников вращение их кривошипов 14, 15 через шатуны 18, 19 и звенья 20, 21 вызывает колебательное движение рычагов 26, 27, которые с помощью поводков 28, 29 сообщают аналогичное движение инструментам 8, 10 по обрабатываемым поверхностям детали.

Существенными отличиями рассматриваемой конструкции технологического оборудования от известных технических решений в области обработки оптических деталей по методу свободного притирания являются направление прикладываемого к обрабатываемым поверхностям рабочего усилия по нормали к этим поверхностям независимо от радиуса их кривизны и постоянное значение давления в непрерывно изменяющейся по величине площади контакта инструментов и линзы в процессе колебательного движения рычагов. Первая из отмеченных особенностей обеспечивается тем, что оси переносного (возвратно-вращательного) движения инструментов проходят через центры кривизны обрабатываемых поверхностей линзы (точки C_A и C_B на рис. 1), а вторая – применением копиров с регулируемыми углами наклона α_A и α_B их рабочих элементов. Эти углы рассчитываются по приведенной выше эмпирической формуле (1), полученной исходя из следующих рассуждений.

В [4] показано, что текущую площадь соприкосновения притирающихся поверхностей инструмента и детали при реализации ее обработки в условиях силового замыкания можно выразить формулой

$$S_T(\varphi) = 2R \int_{y_a}^{y_e} \arcsin \frac{\frac{d_n}{2} \sqrt{1 - \frac{(y - OB \sin \varphi)^2}{\left(\frac{d_n}{2} \cos \varphi\right)^2}}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy +$$

$$+ 2R \int_{y_e}^{\frac{d_n}{2}} \arcsin \frac{\sqrt{\left(\frac{d_n}{2}\right)^2 - y^2}}{\sqrt{R^2 - y^2}} dy, \quad (2)$$

где R – радиус обрабатываемой поверхности линзы диаметром d_n ; d_n – диаметр инструмента; φ – угол наклона инструмента относительно линзы.

Характер изменения этой площади с увеличением амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента по обрабатываемой поверхности (с увеличением смещения инструмента относительно оси симметрии последней), как показали расчеты, носит линейный характер и выражается уравнением прямой с угловым коэффициентом, значение которого определяется соотношением диаметров линзы и инструмента и практически не зависит от радиуса кривизны R последней (табл. 1).

Линейную зависимость $\alpha = \frac{dS(\varphi)}{d\varphi}$ от λ_i

представим в виде

$$\frac{dS(\varphi)}{d\varphi} = b_0 + b_1 \lambda_i. \quad (3)$$

Входящие в выражение (3) величины b_0 и b_1 определяются по методу наименьших квадра-

тов как коэффициенты линейной регрессии, и они имеют вид:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi} \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi}}{n \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2}; \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi} - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{i=1}^n \frac{dS(\varphi)_i}{d\varphi}}{n \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2}. \quad (5)$$

Используя данные табл. 1, для $R = 140$ мм получим: $b_0 = 64,15$; $b_1 = -36,1$. Следовательно, $\alpha = 64,15 - 36,1\lambda$.

Если принять, например, $\lambda = 0,8$, то $\frac{dS(\varphi)}{d\varphi} = 35,27^\circ$, что коррелирует с данными табл. 1 с точностью 99,2 %, которая является приемлемой для практических целей.

Реализация в предлагаемом технологическом оборудовании направления рабочего усилия по нормали к обрабатываемым поверхностям линзы способствует, как видно из представленных на рис. 2 результатов экспериментальных исследований, уменьшению времени достижения требуемой ее точности по сравнению с вертикальным направлением обсуждаемого усилия.

Таблица 1

Значения угла наклона кривой изменения площади $\frac{dS(\varphi)}{d\varphi}$ в зависимости от соотношения диаметров инструмента и линзы $\lambda_i = d_n/d_n$ для различных R

Values of the slope of the curve of change in area $\frac{dS(\varphi)}{d\varphi}$ depending on the ratio of the diameters of the tool and lens $\lambda_i = d_n/d_n$

for different R

$R, \text{ мм}$	$d_n = 50$	$d_n = 60$	$d_n = 80$	$d_n = 80$	$d_n = 90$
	λ_i				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
80	48°	43,5°	39,4°	35,9°	32,9°
100	47,5°	42,7°	38,7°	35,4°	32,5°
120	47,6°	42,7°	38,8°	35,6°	32,8°
140	46,8°	42,1°	38,2°	35,0°	32,3°

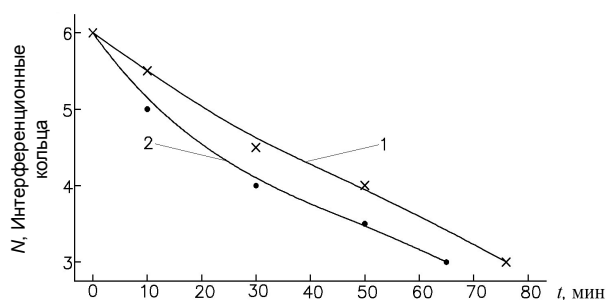


Рис. 2. Характер изменения скорости съема припуска с исполнительной поверхности линзы при направлении силы прижима инструмента по вертикали (1) и по радиусу кривизны (2) детали

Fig. 2. Nature of the change in the rate of allowance removal from the working surface of the lens when the tool pressure is directed vertically (1) and along the radius of curvature of the part (2)

Обработка сводилась к полированию выпуклой сферической поверхности радиусом кривизны 132,84 мм линзы диаметром 72 мм из оптического стекла марки ТФ1 пенополиуретановым полировальником диаметром 60 мм с использованием водной суспензии полирита с оптимальным соотношением Т (твёрдая фаза – порошок полирита) к Ж (жидкая фаза – вода), равным 1 к 9 [5]. Стабильность радиуса кривизны полировальника поддерживалась периодической правкой его рабочей поверхности алмазным правильником в виде гриба с точно настроенным по определенной методике радиусом кривизны.

Для оценки точности радиуса кривизны линзы использовалось стекло с эталонной рабочей поверхностью $-R132,84$ мм (рабочее

пробное стекло), которая сопрягалась с обрабатываемой поверхностью линзы. При этом определяли количество интерференционных колец Ньютона N в плоскости сопряжения.

В качестве исходного образца использовали линзу, предварительно отполированную с точностью кривизны сферической поверхности $N = 6$, которую подвергали дальнейшему полированию до достижения точности $N = 3$. Эта точность достигалась за 77 и 66 мин в случае соответственно вертикального направления рабочего усилия (кривая 1 на рис. 2) и при его направлении по нормали (кривая 2 на рис. 2). Следовательно, производительность процесса во втором случае повышается в среднем на 15 %. Кроме того, уменьшается местная (локальная) погрешность ΔN с 0,3 до 0,2, что свидетельствует об улучшении качества обработки.

Формализация геометрических связей исполнительного механизма технологического оборудования

При абразивной обработке оптических деталей в условиях силового замыкания величина снимаемого материала с заготовки определяется скоростью скольжения инструмента относительно обрабатываемой поверхности [6]. Значение этой скорости представляет собой результат геометрического сложения векторов линейных скоростей относительного вращения инструмента и детали, а также переносного (колебательного) движения последней относительно инструмента (или наоборот).

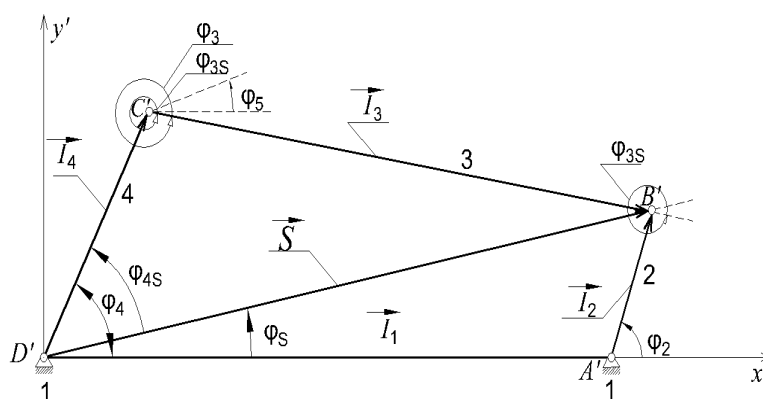


Рис. 3. Конструктивная связь звеньев кривошипно-шатунного механизма

Fig. 3. Structural connection of the links of the crank mechanism

Определим аналитическое выражение для линейной скорости переносного движения инструмента при обработке выпуклой поверхности линзы, которое задается возвратно-вращательным перемещением выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования. Отмеченное перемещение, в свою очередь, определяется движением звеньев 15, 19, 21 (рис. 1) шарнирного четырехзвенника. В связи с этим проведем исследование работы последнего, векторная схема которого приведена на рис. 3, где $\vec{l}_1 \dots \vec{l}_4$ – длина его звеньев, $\vec{s}$ – вспомогательный вектор, необходимый для определения координат точки B' .

Учитывая расположение векторов на рис. 3, можно записать:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{s}; \quad (1)$$

$$\vec{l}_3 + \vec{l}_4 = \vec{s}. \quad (2)$$

Из рис. 1 и 3 видно, что переносное движение рычага 27, характеризуемое углом φ_5 , зависит от угла φ_4 , т. е. $\varphi_5 \sim \varphi_4$. Угол φ_4 , в свою очередь, является функцией угла φ_2 [7], значение которого определяется положением входного звена 2 исполнительного механизма. Если учесть, что согласно конструктивным особенностям последнего при $\varphi_2 = 0$; $\varphi_4 \neq 0$; а $\varphi_{45} = 90^\circ$ [8], запись $\varphi_5 \sim \varphi_4$ можно представить в виде следующего равенства:

$$\varphi_5 = \varphi_4 - \varphi_{45}. \quad (3)$$

Входящий в (3) угол φ_4 , как видно из рис. 3, выражается соотношением

$$\varphi_4 = \varphi_{4s} + \varphi_s, \quad (4)$$

причем (см. треугольник $B'C'D'$ на рис. 3)

$$\varphi_{4s} = \arccos \frac{l_4^2 + s^2 - l_3^2}{2l_4s}. \quad (5)$$

Выражения для угла φ_s и параметра s можно получить соответственно из проекций соотношения (2) на оси координат x' и y' и треугольника $D'A'B'$ (рис. 3). Данные проекции имеют вид:

$$l_1 + l_2 \cos \varphi_2 = s \cos \varphi_s; \quad (6)$$

$$l_2 \sin \varphi_2 = s \sin \varphi_s. \quad (7)$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{l_2 \sin \varphi_2}{l_1 + l_1 \cos \varphi_2}. \quad (8)$$

С учетом отмеченного для параметра s получаем следующее равенство:

$$s = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2}. \quad (9)$$

При определении характера колебательного движения инструментов 8 и 10 по поверхности линзы будем рассматривать перемещение точек C , расположенных на оси их вращения и характеризуемых радиус-вектором $\vec{l}_{OC}$. Для определения положения этого вектора введем угол ψ_C (рис. 4), который равен углу отклонения оси симметрии выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования, т. е.

$$\psi_C = \varphi_5, \quad (10)$$

причем в крайних точках длины штриха L верхнего звена этот угол принимает значения $\psi_C^{\max}$, и $\psi_C^{\min}$, а в среднем – $\psi_C^{\text{сим}}$. Эти углы, как видно из соотношений (3) и (10), можно определить, если известен закон движения звеньев 20, 21 шарнирного четырехзвенника, который (закон) определяется углами $\varphi_4^{\max}$, $\varphi_4^{\min}$, $\varphi_4^{\text{сим}}$.

Анализ работы шарнирного четырехзвенника позволяет заключить (рис. 3), что при расположении звеньев 2 и 3 вдоль одной линии выходное звено исполнительного механизма будет принимать максимальные отклонения от среднего значения в своем колебательном движении, причем в случае равенства нулю длины второго звена остальные звенья неподвижны. Тогда, как видно из рис. 3, получим

$$\cos \varphi_4^{\text{сим}} = \frac{l_4^2 + l_1^2 - l_3^2}{2l_4l_1}, \quad (11)$$

причем

$$\cos \varphi_4^{\max} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_2 + l_3)^2}{2l_1l_4}; \quad (12)$$

$$\cos \varphi_4^{\min} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 - l_2)^2}{2l_1l_4}. \quad (13)$$

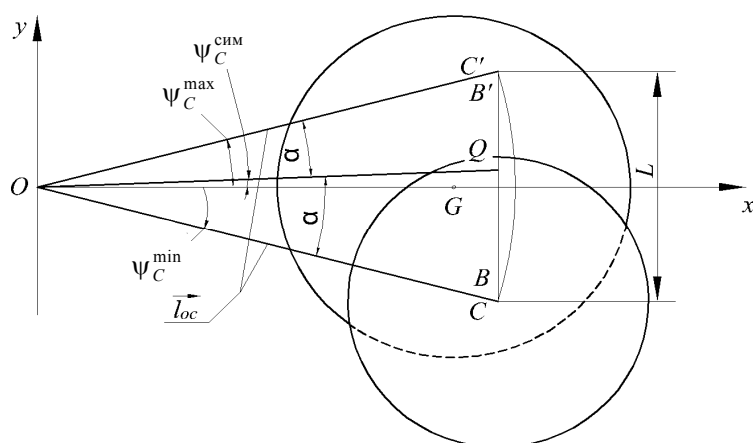


Рис. 4. Траектория колебательного перемещения инструмента

Fig. 4. Trajectory of the oscillatory movement of the tool

Если амплитуда колебательного движения инструмента по обрабатываемой поверхности линзы симметрична относительно оси ее вращения, то, как видно из рис. 4, $\psi_C^{\text{сим}} = 0$. Тогда, принимая во внимание равенства (10) и (3), можно записать, что $\psi_4^{\text{сим}} = \varphi_{45}$, а с учетом выражения (11) получим

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \varphi_{45}}. \quad (14)$$

Обработка оптических деталей по методу свободного притирания является одним из наиболее точных приемов получения прецизионных поверхностей плоского и сферического профилей, что достигается гибким регулированием параметров режимов обработки. Наиболее действенным из этих параметров является изменение величины амплитуды L колебательного движения инструмента. Это изменение выполняется регулированием величины звена 2 кривошипно-шатунного механизма (рис. 3) (в технологическом оборудовании на рис. 1 – регулированием расстояний l_1 и l_2 кривошипов 14 и 15). Поэтому для эффективного осуществления такого регулирования на практике целесообразно установить аналитическую связь между L и l_2 .

Из рис. 3 можно записать:

$$\psi_C^{\text{max}} = \psi_C^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}; \quad (15)$$

$$\psi_C^{\text{min}} = \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} - \psi_C^{\text{сим}}. \quad (16)$$

С учетом этого справедливы следующие равенства для φ_4 :

$$\varphi_4^{\text{max}} = \varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}; \quad (17)$$

$$\varphi_4^{\text{min}} = \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} - \varphi_4^{\text{сим}}.$$

Тогда на основании (12) и (17) получим

$$l_2 = \sqrt{l_4^2 + l_1^2 - 2l_1l_4 \cos \left(\varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} \right)} - l_3. \quad (18)$$

Кроме того, рис. 3 позволяет записать выражение, отображающее геометрическую связь звеньев исполнительного механизма. Это выражение имеет вид

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4. \quad (19)$$

Если равенство (19) спроецировать на координатную ось $D'x'$ (рис. 3), а затем продифференцировать его по φ_2 , то в результате получим

$$l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3 i_{32} + l_4 \sin \varphi_4 i_{42}, \quad (20)$$

где [8]

$$i_{32} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} = \frac{d\varphi_3/dt}{d\varphi_2/dt} = \frac{\omega_3}{\omega_2}; \quad (21)$$

$$i_{42} = \frac{d\varphi_4}{d\varphi_2} = \frac{d\varphi_4/dt}{d\varphi_2/dt} = \frac{\omega_4}{\omega_2}. \quad (22)$$

Следовательно, угловая скорость четвертого звена четырехзвенника связана с кинематической передаточной функцией i_{42} соотношением

$$\omega_4(t) = i_{42}\omega_2(t), \quad (23)$$

причем [9]

$$i_{42} = \frac{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_2)}. \quad (24)$$

Согласно кинематической схеме технологического оборудования для обработки линз (рис. 1) движения рычагов 20, 21 и штанг 24, 25 совершаются синхронно. Поэтому с учетом рис. 3 можно записать

$$\omega_4(t) = \omega_5(t) = \dot{\psi}_C, \quad (25)$$

где $\omega_5(t)$ и $\dot{\psi}_C$ – угловые скорости выходного звена исполнительного механизма и центра инструмента соответственно.

Используя формулу Эйлера, линейную скорость инструментов в векторной форме можно записать в виде [10]

$$\vec{V}_C = \vec{\dot{\psi}}_C \times \vec{l}_{OC}, \quad (26)$$

где $\vec{l}_{OC}$ – длина выходного звена исполнительного механизма технологического оборудования (рис. 4).

Если учесть проекции векторов $\dot{\psi}_C$ и $\vec{l}_{OC}$ в виде соответственно $\dot{\psi}_C = (0 \ 0 \ \dot{\psi}_C)^T$; $\vec{l}_{OC} = (l_{OC} \cos \psi_C \ l_{OC} \sin \psi_C \ 0)^T$ и решить векторное равенство (26), то в итоге можно записать вектор

$$\vec{V}_C = (-\dot{\psi}_C l_{OC} \sin \psi_C \ \dot{\psi}_C l_{OC} \cos \psi_C \ 0)^T, \quad (27)$$

модуль которого $V_C = \dot{\psi}_C l_{OC}$ и представляет собой искомую скорость возвратно-вращательных перемещений инструментов в процессе обработки оптических деталей со сферическими поверхностями на предлагаемом технологическом оборудовании.

ВЫВОДЫ

1. Приведена кинематическая схема технологического оборудования, позволяющая реа-

лизировать двустороннюю обработку линз с тонким центром при направлении рабочего усилия по нормали к формообразующей сферической поверхности и поддержании постоянного давления в непрерывно изменяющейся зоне контакта притирающихся сегментов инструмента и детали, что способствует повышению параметров качества линз и производительности процесса их шлифования и полирования.

2. Выполнена формализация исполнительного механизма предложенного технологического оборудования с учетом геометрических и кинематических связей его звеньев, в результате чего получено аналитическое выражение для расчета линейной скорости возвратно-вращательного перемещения инструментов, являющейся одной из основных составляющих в результирующей скорости скольжения последних по обрабатываемой поверхности линзы.

3. Проведены экспериментальные исследования процесса финишной обработки линз по классической схеме, когда усилие прижима инструмента в процессе его возвратно-вращательного перемещения по исполнительной поверхности детали направлено по вертикали, и по схеме, когда это усилие совпадает с нормалью к сферической поверхности детали. В результате выявлено повышение производительности и качества обработки в среднем на 15 и 30 % соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент BY 7911, МПК В 24В 13/00 (2006.01). Способ одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями: № а 20030242: заявлено 18.02.2003: опубл. 30.04.2006 / А. С. Козерук, И. П. Филонов; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/57016/7911.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
2. Патент BY 22390, МПК7 В 24 В 13/02 (2006.01). Станок для одновременно двусторонней обработки высокоточной линзы малой жесткости с пологими поверхностями: № а 20170098: заявлено 28.03.2017: опубл. 30.10.2018 / А. С. Козерук; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/61155/22390.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
3. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. Минск: ДизайнПРО, 1995. 208 с.

4. Анализ кинематики контакта инструмента и заготовки при обработке линз / А. С. Козерук, Д. Л. Мальпика, А. А. Сухоцкий [и др.] // Вес. Нац. акад. наук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2019. Т. 64, № 2. С. 429–437. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-429-437>.
5. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. М.: Высш. шк., 1963. 519 с.
6. Preston, E. W. The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines / E. W. Preston // Journal of the Society Technology. 1927. No 11. P. 214–256.
7. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. 176 с.
8. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А. С. Козерук Минск, 1997. 317 с.
9. Исследование кинематических закономерностей процесса двусторонней обработки двояковыпуклых оптических деталей / А. С. Козерук, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович [и др.] // Весці Нац. акад. навук. Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 2. С. 26–31.
10. Двусторонняя обработка линз малой жесткости / А. С. Козерук, В. В. Сафонов, М. И. Филонова [и др.] // Наука и техника. 2025. Т. 24, № 1. С. 33–39. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-33-39>.

Поступила 02.06.2025

Подписана в печать 12.08.2025

Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Kozeruk A. S., Filonov I. P. (2006) *Method for Simultaneous Double-Sided Machining of Parts with Spherical Surfaces*: Patent Republic of Belarus no. 7911. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/57016/7911.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in Russian).
2. Kozeruk A. S. (2018) *Machine for Simultaneous Double-Sided Processing of High-Precision, Low-Rigidity Lenses*

with Flat Surfaces. Patent Republic of Belarus no. 22390. Available at: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/61155/22390.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in Russian).

3. Filonov I. P., Klimovich F. F., Kozeruk A. S. (1995) *Control of the Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices*. Minsk, DesignPRO Publ. 208 (in Russian).
4. Kozeruk A. S., Malpica Y. L., Sukhotski A. A., Yurinok V. I., Filonova M. I., Shamkalovich V. I. (2019) Analysis of Kinematics of Tool and Work Piece Contact During Lens Processing. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 64 (4), 429–437. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-429-437> (in Russian).
5. Bardin A. N. (1963) *Optical Glass Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 519 (in Russian).
6. Preston E. W. (1927) The Theory and Design Plate Glass Polishing Machines. *Journal of the Society Technology*, (11), 214–256.
7. Kozeruk A. S. (1997) *Shaping of Precision Surfaces*. Minsk, Publishing House "VUZ-UNITI". 176 (in Russian).
8. Kozeruk A. S. (1997) *Control of the Shaping of Precision Surfaces of Machine Parts and Devices Based on Mathematical Modeling* [dissertation]. Minsk. 317 (in Russian).
9. Kozeruk A. S., Sukhotski A. A., Klimovich V. F., Filonova M. I. (2008) Study of Kinematic Regularities of the Process of Double-Sided Processing of Biconvex Optical Parts. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, (2), 26–31 (in Russian).
10. Kozeruk A. S., Safonov V. V., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Yurinok V. I. (2025) Double-Sided Processing of Low-Hardness Lenses. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*. 24 (1), 33–39. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-33-39> (in Russian).

Received: 02.06.2025

Accepted: 12.08.2025

Published online: 30.09.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-393-401>

УДК 001.891.53 [627.8.034:712.5]

Математическое моделирование прохождения паводка на реконструируемом гидроузле

Магистр О. В. Немеровец¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Беларусь имеет сравнительно небольшое количество крупных гидроузлов из-за равнинного рельефа и умеренного климата. Все они построены в последнее десятилетие и удовлетворяют требованиям нормативных документов. Также на территории страны располагаются более 140 гидроузлов, относящихся к 4-му классу надежности. Необходимо отметить, что эксплуатация водохозяйственных сооружений играет важную роль в регулировании стока рек, обеспечении водоснабжения, ирригации, судоходства и защите от паводков. В работе рассмотрены подходы к математическому моделированию процессов прохождения паводков через реконструируемые гидроузлы. Основное внимание уделено разработке и применению комплексных моделей, позволяющих прогнозировать изменение уровней воды, нагрузок на сооружения и возможных аварийных ситуаций. Разработанная методика основана на совместном решении уравнений баланса воды и гидродинамических уравнений (Сен-Венана) для описания движения потока в водохранилище и нижнем бьефе. Для учета особенностей реконструируемого гидроузла применяются уточненные расчеты пропускной способности водосбросов, влияние изменения профиля сооружений. Предлагается алгоритм, включающий: оценку исходных гидрологических данных и сценариев паводка; расчет динамики наполнения водохранилища; моделирование взаимодействия потоков с элементами гидроузла. Проведенные расчеты позволяют определить критические уровни воды, оптимальные режимы управления затворами и оценить риски перелива или разрушения сооружений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке проектов реконструкции, в оперативном управлении гидротехническими сооружениями и для подготовки планов мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций. На основании методики, разработанной автором, рассмотрен пример прогнозного расчета уровней в русловом водохранилище ГЭС «Яново» и определены параметры потока в нижнем бьефе с определением границ затопления.

Ключевые слова: расход, паводок, водохранилище, напор, водосброс, уравнение баланса воды, гидрограф паводка, моделирование, затопление, пойма

Для цитирования: Немеровец, О. В. Математическое моделирование прохождения паводка на реконструируемом гидроузле / О. В. Немеровец // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 393–401. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-393-401>

Mathematical Modeling of Flood Flow at a Reconstructed Hydroelectric Complex

O. V. Nemerovets¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Belarus has a relatively small number of large hydroelectric power plants due to the flat terrain and moderate climate, all of them were built in the last decade and meet all the requirements of regulatory documents. There are also more

Адрес для переписки

Немеровец Ольга Владимировна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220014, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
fes@bntu.by

Address for correspondence

Nemeravets Volha V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
fes@bntu.by

than 140 hydroelectric structures located in the country that belong to the 4th reliability class. It should be noted that the operation of water management structures plays an important role in regulating river flows, ensuring water supply, irrigation, navigation and flood protection. The paper considers approaches to mathematical modeling of the processes of flood flow through reconstructed hydroelectric structures. The main attention is paid to the development and application of complex models that allow forecasting changes in water levels, loads on structures and possible emergency situations. The developed methodology is based on the joint solution of water balance equations and hydrodynamic equations (Saint-Venant) to describe the flow in the reservoir and downstream. To take into account the features of the reconstructed hydroelectric structure, refined calculations of the capacity of spillways and the impact of changes in the profile of structures are used. An algorithm is proposed that includes: assessment of initial hydrological data and flood scenarios; calculation of reservoir filling dynamics; modeling of flow interactions with hydraulic structure

elements. The calculations performed allow us to determine critical water levels, optimal gate control modes, and assess the risks of overflow or destruction of structures. The results obtained can be used in developing reconstruction projects, in operational management of hydraulic structures, and for preparing plans for preventing emergency situations. Based on the methodology developed by the author, an example of predictive calculation of levels in the channel reservoir of the Yanovo hydroelectric power station (HPS) has been considered and the flow parameters in the downstream pool have been determined with the definition of flood boundaries.

Keywords: discharge, flood, reservoir, pressure, spillway, water balance equation, flood hydrograph, modeling, inundation, floodplain

For citation: Nemerovets O. V. (2025) Mathematical Modeling of Flood Flow at a Reconstructed Hydroelectric Complex. *Science and Technique*. 24 (5), 393–401. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-393-401> (in Russian)

Введение

Гидротехнические сооружения (ГТС) являются важнейшими элементами водохозяйственной инфраструктуры, обеспечивая регулирование стока, защиту от наводнений, энергетическую выработку и водоснабжение. Одним из наиболее ответственных режимов работы ГТС является пропуск паводковых расходов, при котором возникает комплексная нагрузка на сооружения, требующая высокой точности прогнозов гидродинамических процессов [1–4].

В мировой практике анализ и прогноз поведения гидроузлов при паводках часто выполняются на основе математического моделирования, позволяющего воспроизводить сложные взаимодействия потока с элементами сооружений и прилегающей гидросистемой. Применение уравнений неустановившегося движения (Сен-Венана, Буссинеска) и балансовых моделей обеспечивает возможность расчета изменения уровней воды, скоростей течения и распределения расходов в пространстве и времени.

Особое внимание в литературе уделяется каскадным гидроузлам [5–7], где согласованность работы сооружений на разных ступенях определяет эффективность пропуска паводка. Несвоевременное открытие или закрытие водосбросных затворов может вызвать переливы через гребни плотин и привести к авариям, что

подтверждается анализом катастрофических событий в разных странах.

В Беларуси и странах СНГ исследования в этой области направлены на создание адаптированных расчетных схем, учитывающих местные гидрологические условия, конструктивные особенности сооружений и сценарии их реконструкции. Модели позволяют оценивать не только гидравлику потока, но и морфодинамические изменения, включая размыв грунтовых плотин, что критически важно при прогнозировании аварийных ситуаций.

Несмотря на значительные успехи, многие существующие подходы ограничены недостатком исходных данных о геометрии водохранилищ, коэффициентах шероховатости и характеристиках водосбросных устройств, что снижает точность прогнозов. Поэтому развитие комплексных методов расчета, интегрирующих балансовые и гидродинамические модели, остается актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка методики математического моделирования прохождения паводка через реконструируемый гидроузел, включающей расчет переполнения водохранилища и прогноз распространения потока в нижнем бьефе.

Основная часть

В 2025 г. проектной организацией РУП «Белнипиэнергопром» проводилась разработка

проектной документации на реконструкцию гидроузла ГЭС «Яново». Основная задача при выполнении реконструкции гидроузла – это пропуск основных расходов с учетом обновленных гидрологических данных. На основании этой задачи разработана и выполнена апробация методики математического моделирования прохождения паводка, включающей расчет переполнения водохранилища и прогноз распространения волны перемещения в нижнем бьефе

Водохранилище ГЭС «Яново» расположено у д. Изабелино Островецкого района, на р. Лоща. Построено в 1955 г. по проекту Белорусского филиала «Гипросельэлектро». Было запроектировано как русловое, регулирование – суточное. По проекту предназначалось для целей энергетики, водного благоустройства. Площадь зеркала – 63,24 га, площадь мелководий – 0,4 км², длина – 7,7 км, ширина: максимальная – 0,3 км, средняя – 0,13 км; средняя глубина – 2,1 м. Объем: полный – 2,3 млн м³, полезный – 0,1 млн м³. Разность отметок НПУ и УМО – 0,5 м.

План сооружений гидроузла представлен на рис. 1 и включает в себя бетонную водосливную плотину в виде водослива с широким порогом, состоящую из двух пролетов по 6 м, здания ГЭС и грунтовой однородной плотины.

Основу расчета уровня воды $\nabla_{\text{вдхр}}(t)$ в водохранилище при пропуске паводка составляет уравнение баланса воды в водохранилище, которое взято в [8] и дополнено:

$$\frac{dH}{dt} \Omega = Q_{\text{пав}} - Q_{\text{вых}} - Q_{\text{и}} - Q_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $H = H(t) = \nabla_{\text{вдхр}}(t) - \nabla_{\text{л}}$ – напор в водохранилище на пороге бетонной плотины; $\Omega = \Omega(H)$ – площадь зеркала водохранилища; $Q_{\text{пав}}$ – расчетный расход паводка во входном створе водохранилища; $Q_{\text{вых}}$ – расход в створе водосбросных сооружений; $Q_{\text{и}}$ – расход, используемый для энергетики (предполагается постоянным), $Q_{\text{р}}$ – расход воды через резервный водосброс.

Для расчета уровней в водохранилище с использованием уравнения (1) предварительно выполняем ряд действий.

1. Нахождение эмпирической зависимости $\Omega = \Omega(H)$.

Площадь водной поверхности Ω водохранилища ГЭС «Яново» в зависимости от напора H в водохранилище была задана в виде таблицы проектных данных и графика, представленного на рис. 2.

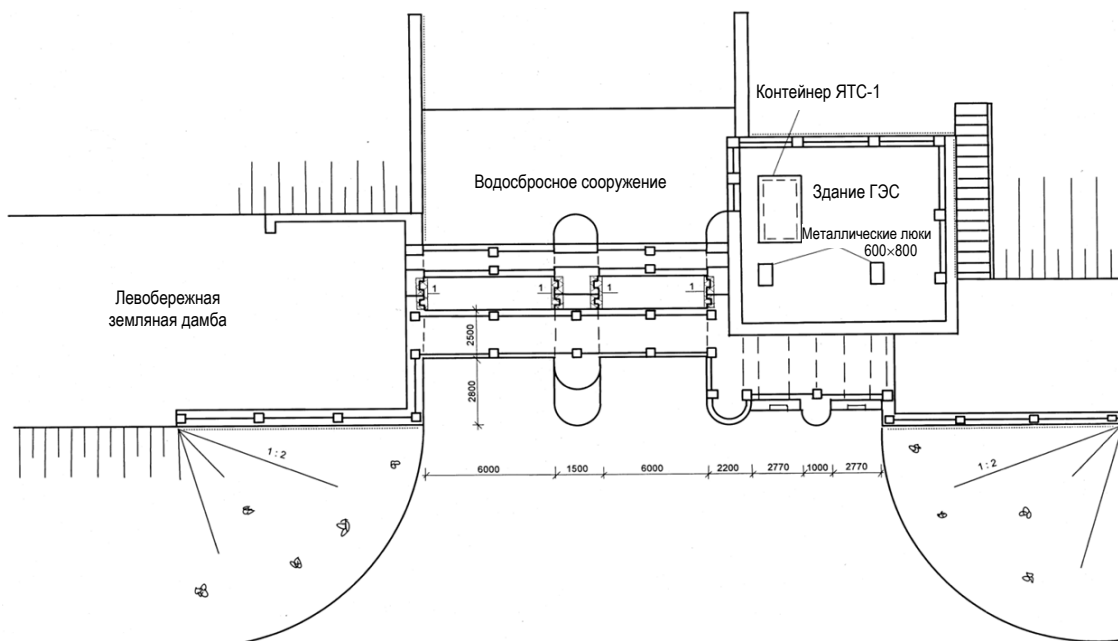


Рис. 1. План сооружений гидроузла

Fig. 1. Hydroelectric power station construction plan

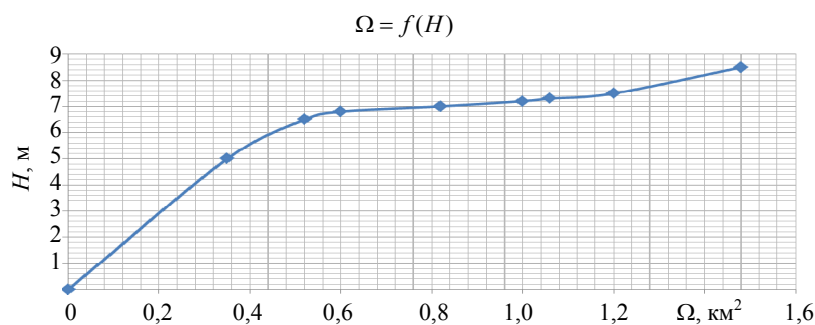


Рис. 2. График зависимости площади зеркала водохранилища от напора $\Omega = \Omega(H)$, построенный по исходным данным

Fig. 2. Graph of the reservoir surface area versus pressure $\Omega = \Omega(H)$, constructed using the initial data

2. Определение расхода в створе водосбросного сооружения $Q_{\text{вых}}$.

Учитывая конструктивные особенности сооружения расход $Q_{\text{вых}}$ определяется по формуле [9]:

$$Q_{\text{вых}} = \sigma_n \varepsilon m n b \sqrt{2g} (\nabla_{\text{вдхр}} - \nabla_{\Lambda}), \quad (2)$$

где n – число водосливных отверстий, открытых полностью; ε – коэффициент бокового сжатия; m – то же расхода для водослива с широким порогом; σ_n – то же подтопления; b – ширина одного водосливного отверстия, м; $\nabla_{\text{вдхр}}$ – отметка уровня воды в водохранилище в зависимости от периода прохождения паводка, м; ∇_{Λ} – то же гребня водосливной плотины, м.

Коэффициент бокового сжатия ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{0,1}{\sqrt[3]{0,2}} \cdot 4 \sqrt{\frac{b}{b+d}} \cdot \left(1 - \frac{b}{b+d}\right), \quad (3)$$

где $\alpha = 0,1$ – при плавном очертании быков и устоев; d – осредненная толщина быка, м.

Определим коэффициент расхода m для водослива с широким порогом при прямоугольной входной грани

$$m = 0,36 + 0,01 \cdot \frac{3 - \frac{\nabla_{\Lambda} - \nabla_{\text{дно п}}}{\nabla_{\text{вдхр}} - \nabla_{\Lambda}}}{0,46 + 0,75 \frac{\nabla_{\Lambda} - \nabla_{\text{дно п}}}{\nabla_{\text{вдхр}} - \nabla_{\Lambda}}}. \quad (4)$$

3. Моделирование расхода $Q_{\text{пав}}(t)$ во входном створе первого водохранилища.

На равнинных реках территории Республики Беларусь, а также близлежащих соседних стран чаще всего бывают одновершинные гидрографы половодий, которые рассчитывают по уравнению [10, с. 32]:

$$Q_{\text{пав}} = Q_0 + Q_{\text{max}} \cdot 10^{-a \frac{(1-x)^2}{x}}, \quad (5)$$

где Q_0 – расход предполоводной сработки; $x = t/t_n$; t_n – условная продолжительность подъема половодья; a – параметр, зависящий от коэффициента формы гидрографа λ^* , функционально связанного с коэффициентом несимметричности гидрографа K_s ; Q_{max} – максимальный расход при наводнении, вероятность наступления которого в столетний период составляет p , % (значение p задается).

Методика нахождения всех необходимых параметров для (5) описана в [10–12].

Итак, чтобы определить напор $H(t)$ в водохранилищах при паводке, который описывается гидрографом $Q_{\text{пав}}$, надо выполнить действия, описанные в п. 1–3, и найти начальные значения Q_0 , H_0 . Затем решить уравнение (1) с учетом п. 3. Данная задача не допускает точного решения. Ее приближенное решение можно искать, например, методом Рунге – Кутты.

После определения уровней воды в водохранилище производится их сравнение с проектными и оценивается возможность возникновения чрезвычайной ситуации на гидроузле в результате перелива воды через гребень или превышения максимальных проектных уровней. На следующем этапе производится моделирование течения в нижнем бьефе с учетом расхода в створе водосбросного сооружения. Методика определения параметров потока в

нижнем бьефе, которая описана ниже, позволяет получить графики, учитывающие истечение через водосбросные сооружения в зависимости от периода прохождения паводка, и позволяет получить данные в различные интервалы времени.

Моделирование течения в нижнем бьефе

Решение поставленной задачи заключается в моделировании потока в нижнем бьефе с помощью уравнений Сен-Венана.

Система уравнений Сен-Венана для течения воды в открытом русле произвольного профиля имеет вид [13]:

$$\begin{cases} \alpha \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{W} \right) \right] + gW \left(\frac{\partial h}{\partial x} + i_f - i_p \right) = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь x – протяженность по водотоку; t – время; $W(x, t)$ – площадь живого сечения потока, находящегося на расстоянии x от начала потока в момент времени t ; $Q(x, t)$ – расход воды; $h(x, t)$ – глубина; $i_f(x, t)$ – уклон течения потока; i_p – то же дна в нижнем бьефе.

Коэффициент α учитывает неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока. В [13] отмечается, что имеется достаточно удовлетворительная связь α с коэффициентом шероховатости, по Маннингу: $\alpha = 14,8n + 0,884$, причем если результат расчета по этой формуле составит значение $\alpha > 2$, то рекомендуются принимать $\alpha = 2$.

Скорость потока находим по формуле

$$v(x, t) = \frac{Q(x, t)}{W(x, t)}. \quad (7)$$

Уклон трения i_f потока выразим из формулы Шези

$$i_f = \frac{Q^2}{W^2 C^2 R} = \frac{v^2 n^2}{R^{4/3}}, \quad (8)$$

где $R = \frac{W(x, h)}{P(x, h)}$ – гидравлический радиус живого сечения потока, находящегося на расстоянии x от начала потока и имеющего глубину h , м;

$P(x, h)$ – смоченный периметр сечения, м; C – скоростной коэффициент Шези, вычисленный по формуле Маннинга, $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, м^{0,5}/с;

n – коэффициент шероховатости дна русла [14], с/м^{1/3}.

Учитывая (7) и (8), система (6) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial (v \cdot W)}{\partial x} = 0; \\ \alpha \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \left(\frac{v^2 n^2}{R^{4/3}} - i_p \right) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

С данной системой мы будем работать в дальнейшем.

Используемый способ

описания поверхности в нижнем бьефе

Чтобы система (4) была замкнутой, необходимо знать зависимости площади живого сечения $W(x, h)$ и смоченного периметра $P(x, h)$ от глубины h и расстояния x от прорана. Это предполагает знание геометрии поверхности в нижнем бьефе. Ниже приведена методика описания этой поверхности, которую несложно применить на практике и которая позволяет достаточно легко получить нужные зависимости для W и P . Следуя работе [15], сделаем определенные предположения об этой поверхности.

1. Можно выделить какое-то прямоугольное русло предполагаемого потока, т. е. указать средние значения его ширины B_p , высоты берега h_b , уклона дна i_p , шероховатости n (здесь отличие от [15], так как там речь идет о пойме конкретной реки, т. е. все эти параметры известны); это русло должно начинаться в районе предполагаемого прорана. Выбрать его можно как окрестность линии, состоящей из точек с самыми маленькими геодезическими отметками.

2. Поверхность долины вне этого русла является кусочно-линейной. Это означает, что на каждой стороне долины (левой и правой) относительно выбранного русла можно выде-

лечь n линий $L_0^{(n)}, \dots, L_n^{(n)}$ (индекс вверх указывает на сторону – левую или правую), образованных точками с равными отметками высот $h_B = h_0 < h_1 < \dots < h_n$ относительно дна предполагаемого русла (это – линии уровня, каждая линия $L_k^{(n)}$ соответствует высоте h_k , а линии $L_0^{(n)}$ – линии берега); на каждом из участков между соседними линиями $L_k^{(n)}$ и $L_{k+1}^{(n)}$ берег является кусочно-линейной поверхностью, направляющими линиями которой служат ограничивающие этот участок линии уровня, а образующие – это прямые, соединяющие точки линий уровня, которые лежат в плоскости $S = S_0$ (эта плоскость перпендикулярна руслу и находится на расстоянии x_0 от плотины). Вышесказанное предположение поясняется ниже на рис. 3.

На (рис. 3а) показан план участка, где плоскость $S = S_0$ пересекает линии уровня L_1^n и L_2^n , соответствующие высотам h_1 и h_2 в точках A и B соответственно. Следовательно, отрезок AB считается образующей береговой поверхности на этом участке (между линиям уровня L_1^n и L_2^n). На рис. 3б показано, как выглядит сечение береговой поверхности плоскостью $S = S_0$. Здесь $h_1 < h_2 < h_3 < h_4$ – высоты относительно дна русла точек A, B, C и D соответственно, а $w_A^n < w_B^n < w_C^n < w_D^n$ – расстояния от этих точек до берега русла.

Такое предположение не противоречит обычному устройству речных долин в республике, хотя и вносит определенные погрешности в вычисления. При этом эта погрешность

будет уменьшаться при увеличении числа линий уровня и более точного задания этих линий.

Задавать линии уровня можно таблично [15]. Каждая строка таблицы содержит числа x_k , $w_{k,1}^{(n)} < w_{k,2}^{(n)} < \dots < w_{k,n}^{(n)}$, где x_k – протяженность по водотоку от плотины; $w_{k,m}^{(n)}$ – то же от берега русла до точки пересечения m -й линии уровня, соответствующей глубине h_m , с плоскостью $S = S_k$ (рис. 1б). Значения $w_{k,0}^{(n)} = 0$ для любого k .

Полное решение системы (9) представлено в статьях автора [15–16].

Пример расчета. Рассмотрим пример расчета водохранилища ГЭС «Яново», которое расположено у д. Изабелино Островецкого района на р. Лоша.

Значения основных параметров водохранилища следующие: $\nabla\Lambda = 150,3$ м; $b = 6$ м; $m = 0,37$; $\nabla\text{УМО} = 153,5$ м; $\nabla\text{НПУ} = 153,8$ м; $\nabla\text{ГП} = 155$ м. В нижнем бьефе водохранилища: $i = 0,00176$; $n = 0,03$; ширина трапециевидного русла $b = 15$ м; угол наклона берега α , $\text{ctg}\alpha = 3$.

Расчеты по методике [10] показали, что в (5) для паводка следует взять $a = 1,246$ и с 1%-м уровнем вероятности превышения $Q_{\max} = 119,5$ м³/с, условная продолжительность подъема половодья $t_n = 14,06$ дня, общая продолжительность паводка $T_{\text{пав}} = 39,4$ дня.

Начальный напор в водохранилище принят $H_0 = 3,2$ м $\approx \nabla\text{УМО} - \nabla\Lambda$, начальный расход $Q_0 = 1,5$ м³/с.

Расчет данных с использованием вышепредставленных методик показан в виде графиков на рис. 4–6.

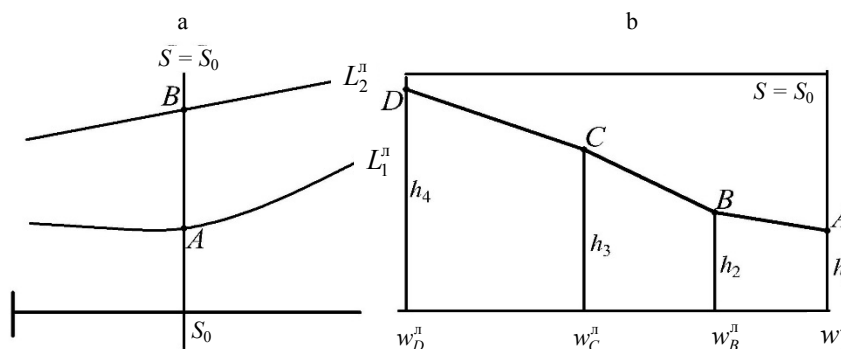


Рис. 3. Схема участка (левого) долины: а – план; б – поперечный разрез

Fig. 3. Diagram of the (left) valley section: а – plan; б – cross section

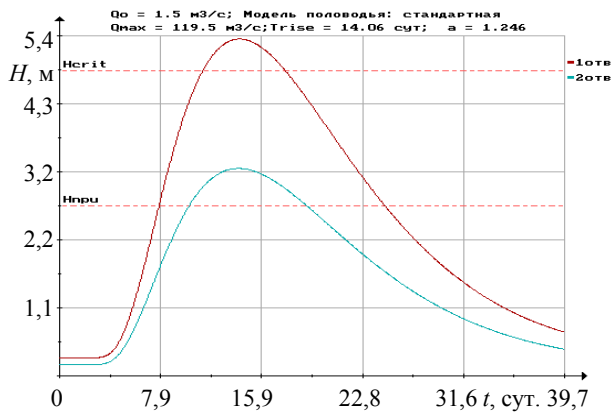


Рис. 4. Напоры в водохранилищах при одном и двух открытых водосливных отверстиях на водосбросе

Fig. 4. Heads in reservoirs with one and two open spillway outlets

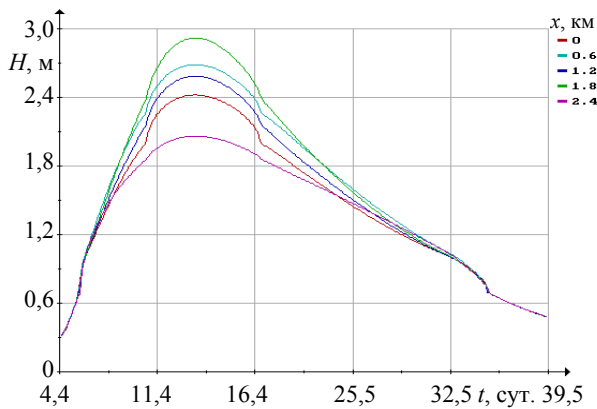


Рис. 5. Глубина воды в нижнем бьефе в зависимости от времени прохождения паводка при максимальном расходе $Q_{\max} = 119.5 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 5. Water depth in the lower pool depending on the flood time at maximum flow rate $Q_{\max} = 119.5 \text{ м}^3/\text{с}$

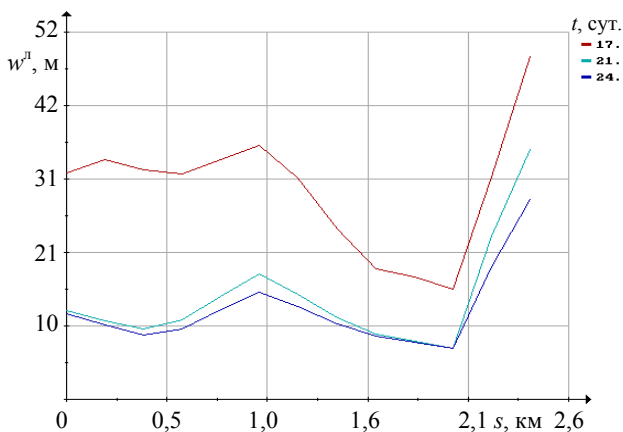


Рис. 6. Ширина затопления левой поймы $w^л$ в различные интервалы времени на расстоянии s от створа плотины

Fig. 6. Width of the floodplain left $w^л$ at different time intervals at a distance s from the dam site

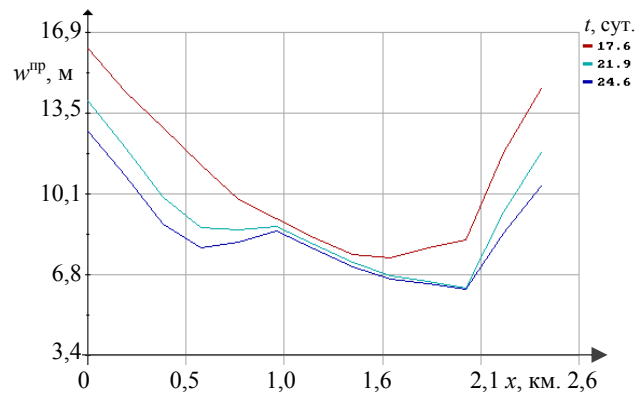


Рис. 7. Ширина затопления правой поймы $w^п$ в различные интервалы времени на расстоянии s от створа плотины

Fig. 7. Width of the right floodplain $w^п$ at different time intervals at a distance s from the dam site

Анализируя графики, представленные на рис. 4–7, можно наблюдать границы затопления территории в нижнем бьефе гидроузла в результате пропуска расхода величиной $119.5 \text{ м}^3/\text{с}$. При анализе графика на рис. 4 видно, что при работе только одного водосливного отверстия на бетонной плотине будет обеспечен перелив воды через гребень грунтовой плотины и переполнение водохранилища. Данные графики позволяют отследить прохождение паводка через весь гидроузел, начиная от входного створа и формирования гидрографа паводка до прохождения волны в нижнем бьефе и определения границ затопления.

Создание и использование математических моделей для описания гидродинамических процессов, возникающих при переполнении водохранилищ и развитии аварийных ситуаций, являются ключевыми инструментами в обеспечении безопасности гидротехнических сооружений и снижении последствий чрезвычайных происшествий. Применение как упрощенных, так и детализированных моделей дает возможность заблаговременно оценить вероятные сценарии развития событий, выявить критические параметры и принять меры для предотвращения или смягчения негативных последствий.

Особое значение имеет учет индивидуальных особенностей каждого гидросооружения, условий его эксплуатации и географических характеристик территории. Модели, основанные на уравнениях гидродинамики и балансовых соотношениях водных масс, позволяют

повысить точность прогнозов и обеспечить качественную информационную поддержку при принятии инженерных и организационных решений. Внедрение таких подходов в системы мониторинга и управления способствует повышению надежности гидротехнических объектов, защите населения и сохранению природной среды.

ВЫВОДЫ

1. Предложен математический метод моделирования прохождения паводка на реконструируемом гидроузле, основанный на совместном решении дифференциального уравнения баланса воды в водохранилище без учета неустановившегося движения по их длине. На входе в водохранилище изменение расхода во времени соответствует гидрографу паводка. Методика расчета позволяет: подобрать графики управления затворами водосбросов, не допускающими перелива через грунтовую плотину; сопоставить $Q_{\max}$ и уровни с проектной пропускной способностью водосбросов и отметками НПУ и ФПУ; определить, какие элементы гидроузла окажутся перегружены.

2. Математическое моделирование предоставляет возможность сформировать графики глубин затопления, скорости потока и времени стояния воды на пойме. Полученные значения необходимы для оценки масштабов ущерба: площади подтопления, числа затронутых населенных пунктов и объектов инфраструктуры (дороги, промышленность и т. д.), ориентировочную численность населения, подлежащую эвакуации, и предварительную материальную оценку ущерба. Практические результаты моделирования могут быть использованы для корректировки планов эвакуации, выбора приоритетных точек защиты (укрепление склонов, временные барьеры), улучшения работы системы оповещения и обоснования инженерных мер (расширение пропускной способности водосбросов).

3. Разработанный метод апробирован при подготовке проектной документации на реконструкцию гидроузла ГЭС «Яново». Проведено моделирование процессов переполнения водохранилища и определены возможные границы затопления территорий нижнего бьефа в зави-

симости от пропускной способности водосбросного сооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малик, Л. К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности / Л. К. Малик. Минск: Наука, 2005. 354 с.
2. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова [и др.]. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. 283 с.
3. Говорушко, С. М. Влияние природных процессов на гидротехнические сооружения (сообщение 2) / С. М. Говорушко // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 2 (50). С. 75–87.
4. Калинин, М. Ю. Водохранилища Беларуси: справ. / М. Ю. Калинин, В. Н. Счисленок, П. П. Рутковский [и др.]. Минск: Полиграфкомбинат, 2005. 183 с.
5. Совершенствование управления каскадом волжских водохранилищ на основе гидродинамических моделей и ГИС-технологий / А. О. Щербаков, А. А. Талызов, И. С. Румянцев [и др.] // Мелиорация и водное хозяйство. 2002. № 2. С. 8–12.
6. Беднарук, С. Е. О планировании мероприятий по снижению риска ущербов от наводнений / С. Е. Беднарук // Безопасность энергетических сооружений: сб. М., 2003. Вып. 11. С. 407–414.
7. Беднарук, С. Е. Опыт управления Волжско-Камским каскадом водохранилищ с использованием имитационных математических моделей в период весеннего половодья / С. Е. Беднарук, С. Ю. Мотовилов // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях: сб. ст. Междунар. конф., М., 2008.
8. Гидрология и гидротехнические сооружения / Г. Н. Смирнов, Е. В. Курлович, И. А. Витрешко, И. А. Мальгина. М.: Высш. шк., 1988. 472 с.
9. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альтшуль, Н. В. Данильченко [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 312 с.
10. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок расчета: ТКП 45-3.04-168-2010 (02250). Введ. 30.12.2009. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 55 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / под ред. В. В. Куприянова. Л.: Гидрометеиздат, 1966. Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Ч. 1, 2: Основные гидрологические характеристики. 720 с.
12. Прогноз уровней в Вилейском водохранилище при пропуске расходов половодья / В. В. Ивашечкин, В. В. Верременюк, Г. Г. Круглов [и др.] // Вестник БрГТУ. Сер. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2017. № 2. С. 57–61.
13. Грушевский, М. С. Волны пусков и паводков в реках / М. С. Грушевский. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 336 с.
14. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1982. 224 с.

15. Приближенная методика расчета затопления поймы реки при экстремальных попусках из водохранилища в период половодья / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, Я. А. Семенова, О. В. Немеровец // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2, № 1. С. 67–74.
16. Верemenюк, В. В. Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, О. В. Немеровец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567>.

Поступила 20.06.2025

Подписана в печать 22.08.2025

Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Malik L. K. (2005) *Risk Factors for Damage to Hydraulic Structures. Security Issues*. Minsk, Nauka Publ. 354 (in Russian).
2. Shchedrin V. N., Kosichenko Yu. M., Baklanova D. V., Baev O. A., Mikhailov E. D. (2016) *Ensuring the Safety and Reliability of Low-Pressure Hydraulic Structures*. Novosibirsk, Russian Research Institute for Land Reclamation Problems. 283 (in Russian).
3. Govorushko S. M. (2019) The Influence of Natural Processes on Hydraulic Structures (Message 2). *Astrakhan-skiy Vestnik Ekologicheskogo Obrazovaniya = Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, (2), 75–87 (in Russian).
4. Kalinin M. Yu., Schislenok V. N., Rutkovskii P. P., Yurevich R. A., Sirotenko V. I., Frolova O. E. *Reservoirs of Belarus. Handbook*. Minsk, Poligrafkombinat Publ. 183 (in Russian).
5. Shcherbakov A. O., Talyzov A. A., Rumyantsev I. S., Pruchkin S. I., Buber A. L. (2002) Improving the Management of the Volga Reservoir Cascade Based on Hydrodynamic Models and GIS Technologies. *Melioratsiya i Vodnoe Khozyaistvo = Irrigation and Water Management*, (2), 8–12 (in Russian).
6. Bednaruk S. E. (2003) On Planning Measures to Reduce the Risk of Flood Damage. *Bezopasnost Energeticheskikh Sooruzheniy: sb* [Safety of Energy Structures: Collection]. Moscow, Iss. 11, 407–414 (in Russian).
7. Bednaruk S. E., Motovilov S. Yu. (2008) Experience of managing of the Volga-Kama Cascade of Reservoirs Using Simulation Mathematical Models During the Spring Flood Period. *Management of Water Resource Systems in Extreme Conditions: Collection of Articles of International Conference, Moscow, June 4–5, 2008* (in Russian).
8. Smirnov G. N., Kurlovich E. V., Vitreshko I. A., Mal'gina I. A. (1988) *Hydrology and Hydraulic Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 472 (in Russian).
9. Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. (1972) *Handbook of Hydraulic Calculations*. Moscow, Energiya Publ. 312 (in Russian).
10. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-168–2010 (02250). *Estimated Hydrological Characteristics. Calculation Procedure*. Minsk, Publishing House of Ministry of Construction and Architecture of the Republic of Belarus, 2010. 55 (in Russian).
11. Kupriyanov V. V. (ed.) (1966) *Surface Water Resources of the USSR. Vol. 5: Belarus and the Upper Dnieper Region. Parts. 1, 2: Main Hydrological Characteristics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 720 (in Russian).
12. Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V., Kruglov G. G., Anatsko Ya. Ya., Soldatenko Ya. A. (2017) Forecast of the Vileika Reservoir Levels During the Flood Discharge. *Vestnik BrGTU. Seriya Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya = Vestnik of Brest State Technical University. Series: Water Management Construction, Thermal Power Engineering and Geoecology*, (2), 57–61 (in Russian).
13. Grushevsky M. S. (1989) *Waves of Water Releases and Floods in Rivers*. Leningrad, Gidrometeizdat Publ. 336 (in Russian).
14. Altshul A. D. (1982) *Hydraulic Resistance*. 2nd ed. Moscow, Nedra Publ. 224 (in Russian).
15. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Semenova Ya. A., Nemeravets O. V. (2018) An Approximate Method for Calculating the Flooding of a River Floodplain During Extreme Releases from a Reservoir in the Period of the High Water. *Vestnik Universiteta Grazhdanskoy Zashchity MChS Belarusi = Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2 (1), 67–74 (in Russian).
16. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Nemeravets O. V. (2021) Simulation of Unsteady Movement in the Downstream of a Hydroelectric Complex During the Destruction of a Soil Dam. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567> (in Russian).

Received: 20.06.2025

Accepted: 22.08.2025

Published online: 30.09.2025

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-402-410>

УДК 656

Обеспечение безопасности дорожного движения как объект национальной научно-технической деятельности в XXI в.

Канд. техн. наук П. В. Вавилов¹⁾

¹⁾ООО «Дорожные решения» (Заславль, Республика Беларусь)

Реферат. Целью настоящей публикации является определение основных направлений национальной научно-технической деятельности в сфере обеспечения безопасности дорожного движения в период с 2000 по 2024 г. в соответствии с современной постановкой проблематики, сформулированной в Концепции обеспечения безопасности дорожного движения. Для этого рассмотрены научно-исследовательские, опытно-конструкторские и опытно-технологические работы, зарегистрированные в Государственном реестре научно-исследовательских работ, а также авторефераты, размещенные в электронном каталоге Национальной библиотеки Беларуси. В статье описаны методы поиска исходных данных в указанных электронных базах данных. В качестве результатов приводятся количественные данные, характеризующие НИОК(Т)Р в сфере обеспечения безопасности дорожного движения, выполненных за последние 25 лет в Республике Беларусь в разрезе ведомственной подчиненности организаций-исполнителей, а также решаемых научных проблем. Показана тенденция к снижению активности научно-технической деятельности в предшествующие пять лет и сформулированы вероятные причины ее возникновения. Анализ диссертационных исследований свидетельствует о наличии экспертного сообщества в сфере обеспечения безопасности дорожного движения. Количество квалификационных научных работ и их проблематика, по мнению автора, являются явными признаками формирования специальности «Обеспечение безопасности дорожного движения», формализация которой могла бы послужить дополнительным импульсом к развитию в данном направлении. В результате проделанной работы предложены направления дальнейших исследований, которые могут быть как продолжением данной работы, так и новыми, соответствующими актуальным проблемам обеспечения безопасности дорожного движения, основанными на принципах межведомственного взаимодействия.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения в Республике Беларусь, научно-исследовательские, опытно-конструкторские и опытно-технологические работы, автореферат диссертации, Концепция обеспечения безопасности дорожного движения

Для цитирования: Вавилов, П. В. Обеспечение безопасности дорожного движения как объект национальной научно-технической деятельности в XXI в. / П. В. Вавилов // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 402–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-402-410>

Ensuring Road Safety as an Object of National Scientific and Technical Activity in the 21st Century

P. V. Vavilau

¹⁾ LLC “Dorozhnyye Resheniya” (Zaslavl, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of this publication is to determine the main directions of national scientific and technical activity in the field of road safety in the period from 2000 to 2024 in accordance with the modern formulation of problems stated in the Concept of Road Safety. For this purpose, research, development and experimental technological works registered in the State

Адрес для переписки
Вавилов Павел Валерьевич
ООО «Дорожные решения»
ул. Советская, д. 114, к. 19,
220034, г. Заславль, Республика Беларусь
Тел.: +375 44 788-02-39
info@dorr.by

Address for correspondence
Vavilau Pavel V.
LLC “Dorozhnyye resheniya”
114/19, Sovetskaya str.,
220034, Zaslavl, Republic of Belarus
Tel.: +375 44 788-02-39
info@dorr.by

Register of Research Works as well as abstracts posted in the electronic catalogue of the National Library of Belarus, were reviewed. The article describes methods for searching source data in the specified electronic databases. The results are presented as quantitative data characterizing R&D in the field of road safety, carried out over the past 25 years in the Republic of Belarus in the context of departmental subordination of the implementing organizations, as well as the scientific problems being solved. A downward trend in the scientific and technical activities in the previous five years is shown and probable causes for its occurrence are formulated. Analysis of dissertation research shows the presence of an expert community in the field of road safety. In the author's opinion, the number of qualifying scientific works and their subject matter are clear signs of the formation of the specialty "Ensuring Road Safety". The formalization of this specialty could provide an additional impetus to the development in this direction. As a result of the work carried out, directions for further research are proposed, which can be either a continuation of this work or new ones, that meet current challenges of road safety, based on the principles of interdepartmental cooperation.

Keywords: road safety in the Republic of Belarus, research, development and experimental technology work, dissertation abstract, Concept of Road Safety

For citation. Vavilau P. V. (2025) Ensuring Road Safety as an Object of National Scientific and Technical Activity in the 21st Century. *Science and Technique*. 24 (5), 402–410. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-402-410> (in Russian)

Введение

Обеспечение безопасности дорожного движения (БДД) в Республике Беларусь является объектом и предметом постоянной деятельности государства – различных его институтов: государственных органов и государственных организаций, комиссий [1], академической науки, высших учебных заведений и других заинтересованных организаций. Одними из таких свидетельств непрерывного и очевидно возрастающего внимания государства являются законодательные акты и государственные программы. Так, в мае 2023 г. была обновлена национальная Концепция обеспечения безопасности дорожного движения [2], которая почти вдвое объемнее предыдущей редакции [3]. В программе «Дороги Беларуси» на 2021–2025 гг. [4] в отличие от предшествующей [5] выделены шесть задач (мероприятий) по повышению безопасности дорожного движения на республиканских автомобильных дорогах, а сама деятельность по повышению БДД становится одной из основ научно-технического обеспечения дорожной отрасли на данный период.

Одним из элементов социально-экономической политики государства является воздействие им на субъекты научной и научно-технической деятельности, основанное на принципах приоритетности, актуальности, получения преимущественного развития, общности деятельности и др. [6]. Научно-техническая деятельность в конкретной сфере человеческой жизнедеятельности служит фактически маркером решения самых важных, востребованных и сложных задач.

В данной работе будет рассмотрена проблематика обеспечения безопасности дорожного движения через призму национальной научно-технической деятельности.

Цель работы: выявить основные направления национальной научно-технической деятельности в сфере обеспечения безопасности дорожного движения в период с 2000 по 2024 г.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1) осуществить поиск работ в реестре научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ (НИОК(Т)Р), относящиеся к сфере обеспечения безопасности движения; проанализировать их тематическую направленность и дать количественную оценку институционального вклада;

2) осуществить поиск в электронном каталоге Национальной библиотеки Беларуси авторефератов по направлению обеспечения безопасности движения; проанализировать их тематическую направленность и дать количественную оценку относительно общего числа работ по дорожной тематике.

Проблема, рассматриваемая в настоящей публикации, решена в первом приближении, вследствие ограничений используемого метода получения исходных данных из открытых источников, а также вероятным смещением оценки автора при классификации научных работ, вызванным личным профессиональным опытом.

Рассмотрение авторефератов в связи с поставленной целью представляет интерес потому, что они являются результатом продолжительной и целенаправленной научной деятельности. Данная деятельность также, как и

НИОК(Т)Р, основана на применении научных методов достижения цели, является актуальной, обладает новизной и значимостью и в целом имеет прямые связи с проводимыми в республике научными программами (темами), развивая их согласно личным взглядам и интересам соискателя. Это в свою очередь приводит к выстраиванию определенных научных взглядов на проблематику и пути ее решения, давая тем самым обратную связь существующему направлению развития научно-технической деятельности, при этом также формируется определенная экспертная среда.

Безопасность дорожного движения. Проблематика

В Беларуси понятие «безопасность дорожного движения» закреплено в Правилах дорожного движения: это состояние дорожного движения, обеспечивающее минимальную вероятность возникновения опасности для движения и дорожно-транспортного происшествия [7].

В ТР ТС 014/2011 [8] данный термин определяется как «состояние дорожного движения, отражающее степень защищенности его участников от дорожно-транспортных происшествий и их последствий» (дублирует ПДД РФ) [9].

Задачи по обеспечению безопасности дорожного движения сформулированы в национальных законах [10, 11] и Концепции обеспечения безопасности дорожного движения [2] (далее – Концепция). Согласно [2], государственная политика в области дорожного движения и обеспечения его безопасности основывается на осуществлении (групповых) мер:

- (14.1) принимаемых в отношении транспортных средств;
- (14.2) принимаемых в отношении водителей механических транспортных средств и самоходных машин (далее – водители);
- (14.3) принимаемых в отношении иных участников дорожного движения (пешеходов, пассажиров, велосипедистов, лиц, передвигающихся на средствах персональной мобильности, и других);
- (14.4) принимаемых в отношении дорожно-транспортной инфраструктуры;
- (14.5) принимаемых в отношении организации дорожного движения;

– (14.6) принимаемых в отношении интеллектуальных транспортных систем

– (14.7) принимаемых в отношении повышения эффективности государственного управления и государственного контроля в области дорожного движения;

– (14.8) принимаемых в отношении формирования государственной идеологии управления дорожным движением;

– (14.9) направленных на получение широкой общественной поддержки.

Каждая из перечисленных в Концепции задач раскрывается в виде перечня мероприятий, соответствующих групповому направлению. Эти задачи в настоящей публикации целесообразно использовать в качестве классифицирующих признаков (тематик) научно-технической деятельности в сфере обеспечения БДД, поскольку позволяют количественно оценить каждое из направлений, содержащихся в Концепции.

Описание метода решения

Поиск НИОК(Т)Р в Государственном реестре научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ (далее – Государственный реестр) [12, 13] осуществлялся 18–24 октября 2024 г. по ключевым словам. Используемые ключевые словоформы и их сочетания: «дорожн*», «движен*», «безопасн* движен*», «транспорт», «происшеств*», «перевозок», «ДТП», «страхован*». Дополнительно работы фильтровались по рубрикам ГРТНИ, основные из которых – «55. Машиностроение», «67. Строительство. Архитектура», «73. Транспорт».

Поиск авторефератов осуществлялся 18–24 октября 2024 г. в электронном каталоге Национальной библиотеки Республики Беларусь [14]. Для поиска по предметной области (поле «Предмет») использовались словосочетания: «безопасность дорожного движения», «автомобильный транспорт», «регулирование дорожного движения», «дорожно-транспортные происшествия», «транспортные средства», «организация перевозок», «безопасность движения», «дорожное движение», «транспортные потоки». Далее уточнялся результат поиска: «Белорусский национальный документ» с последующей перекрестной фильтрацией по полям «Вид доку-

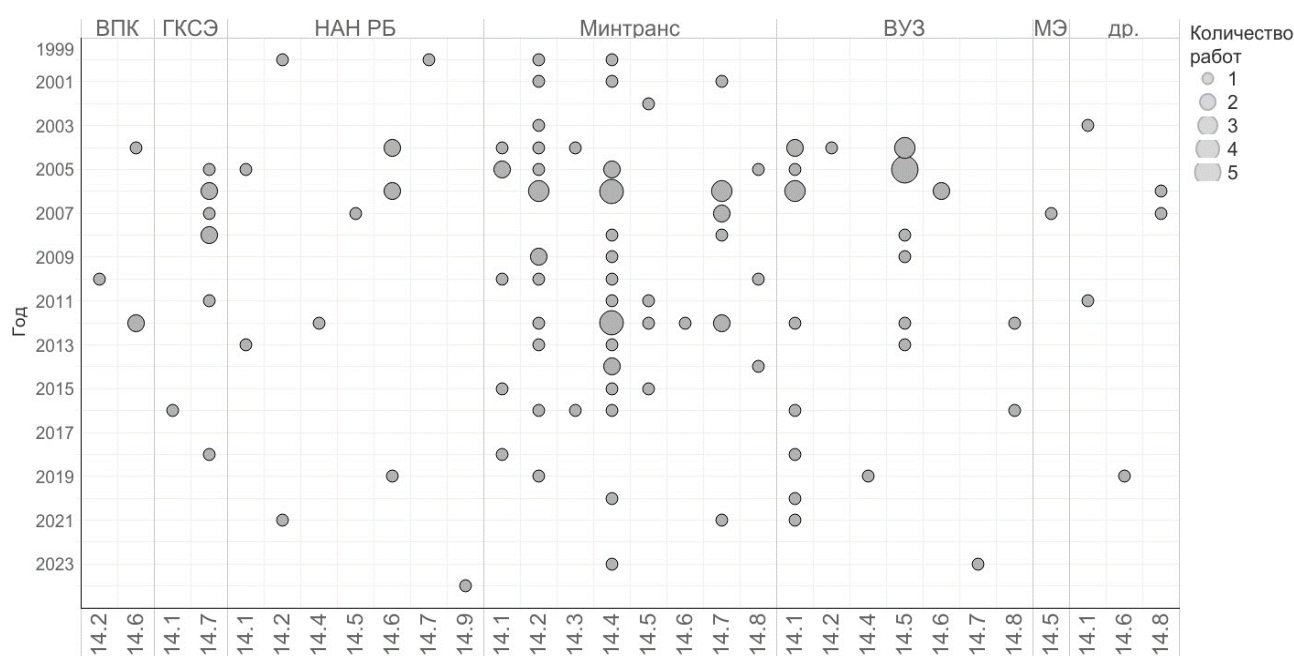
мента» (Авторефераты диссертаций), «Дата издания» (от 2000). Окончательный отбор осуществлялся автором, при этом исключались авторефераты, опубликованные вне Беларуси, а также работы зарубежных исследователей, если тема не касалась белорусской проблематики.

Для поиска авторефератов по дорожной проблематике использовался аналогичный алгоритм, при этом предметная область составляла следующие слова и сочетания: «автомобильные дороги», «искусственные сооружения», «мосты», «путепроводы», «придорожные полосы», «дорожно-строительные материалы», «битум», «дорожные покрытия», «цементобетонные покрытия», «асфальтобетон», «дорожные

одежды», «транспортные сооружения», «дорожное строительство», «дорожное хозяйство», «дороги», «улично-дорожные сети», «дорожные конструкции», «автомобильный транспорт», «транспортная сеть», «транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог».

Результаты и их обсуждение

Результаты поиска в Государственном реестре НИОК(Т)Р, относящихся к сфере обеспечения БДД, а также анализа их тематической направленности в разрезе ведомственной принадлежности за период с 2000 по 2024 г. приведены на рис. 1.



ГКСЭ	НПЦ Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь
ВПК	Военно-промышленный комплекс (ОАО «АГАТ-СИСТЕМ», ООО «Белфортекс», УП «НИИСА»)
ВУЗы	Высшие учебные заведения (Академия МВД, БГУ, БГУИР, БелГУТ, БЕЛМАПО, Белорусско-Российский университет, БНТУ, БрГТУ)
Минтранс	Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь (БелдорНИИ, Белдорцентр, БелНИИТ «Транс-техника», ОАО «Авиакомпания «Белавиа»))
НАН РБ	Национальная академия наук Беларуси (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Институт математики НАН Беларуси, Институт социологии НАН Беларуси, Институт физики НАН Беларуси; НВРУП «Эл-корм», Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, ОИПИ НАН Беларуси)
МЭ	Министерство экономики Республики Беларусь
Др.	Другие организации (БАМЭ, ГУ «Белорусская МИС», НЦЗПИ, ОАО «СВЯЗЬИНВЕСТ»)
14.1–14.9	Меры (групповые) государственной политики в области дорожного движения и обеспечения его безопасности, предусмотренные Концепцией [2]

Рис. 1. НИОК(Т)Р, относящиеся к сфере обеспечения безопасности дорожного движения, за период с 2000 по 2024 г.

Fig. 1. R&D related to road safety, for the period from 2000 to 2024

Представленные данные очевидным образом указывают на определяющую роль Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь (далее – Минтранс) в научно-технической деятельности, направленной на обеспечение БДД. Данная деятельность охватывает восемь из девяти задач по обеспечению БДД, а в количественном отношении 51 % НИОК(Т)Р (64 из 126 работ) выполнено предприятиями дорожного хозяйства.

Почти четверть общего числа НИОК(Т)Р (24 %, 30 работ) реализована в стенах высших учебных заведений, еще 10 % (13 работ) – различными подразделениям Национальной академии наук Беларуси.

Стоит отметить работы, выполненные в НПЦ Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь (далее – ГКСЭ). По своей сути они относятся к экспертной работе, которая отсутствует в перечне мероприятий Концепции. В целях данной публикации они отнесены к задачам «Повышение эффективности государственного управления и государственного контроля в области дорожного движения» (14.7) и «транспортные средства» (14.1) в соответствии с предметом выполненных исследований.

В разрезе решаемой проблематики (рис. 2) Минтранс в трех (14.2–14.4) из девяти направлений выполняет 79–100 % работ. Значительный вклад в направления обеспечения БДД, касающиеся организации дорожного движения (14.5) и транспортных средств (14.1), вносят высшие учебные заведения республики: 67 и 50 % работ соответственно. Наименьшее количество НИОК(Т)Р проведено по направлениям, связанным с получением широкой общественной поддержки (14.9) и в отношении иных участников дорожного движения (14.3): 3 и 2 % соответственно.

Наибольшее количество научных работ, зарегистрированных в Государственном реестре, приходится на направления «Дорожно-транспортная инфраструктура» (14.4) и «Транспортные средства» (14.1) – 20 и 17 % соответственно. Еще по трем направлениям – «Повышение эффективности государственного управления и государственного контроля в области дорожного движения» (14.7), «Водители» (14.2) и «Организация дорожного движения» (14.4) – выполнено практически равное количество работ, в сумме составляющих 45 % от общего числа.

В целом можно говорить, что названные пять задач обеспечения БДД решаются на систематической основе – в среднем по каждому из этих направлений выполнялась одна работа ежегодно.

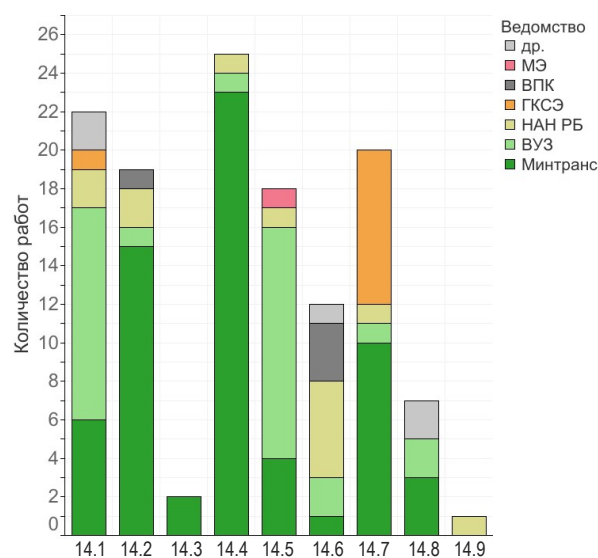


Рис. 2. Проблематика НИОК(Т)Р, относящихся к сфере обеспечения безопасности дорожного движения (2000–2024 гг.)

Fig. 2. R&D issues related to road safety (2000–2024)

На анализируемом промежутке времени регистрировалось в среднем семь новых НИОК(Т)Р каждый год. Максимальное единовременное количество работ (20 ед.) отмечается в 2006 г., когда была утверждена первая Концепция [3]. Еще один пик отмечается в 2012 г.: зарегистрированы 15 работ, большинство из которых связано с подготовкой к введению в действие на территории Беларуси ТР ТС 014/2011 [8].

Рассматривая научно-техническую деятельность Минтранса в сфере обеспечения БДД (рис. 3), необходимо выделить лидирующую роль Белорусского научно-исследовательского института транспорта «Транстехника». В БелНИИТ «Транстехника» выполнено 29 % (37 ед.) общего числа НИОК(Т)Р в сфере обеспечения БДД по семи направлениям деятельности. Основная специализация – «транспортные средства» (14.1), «водители» (14.2) и «повышение эффективности государственного управления и государственного контроля в области дорожного движения» (14.7): 27, 79 и 45 % от общего числа по направлению соответственно.

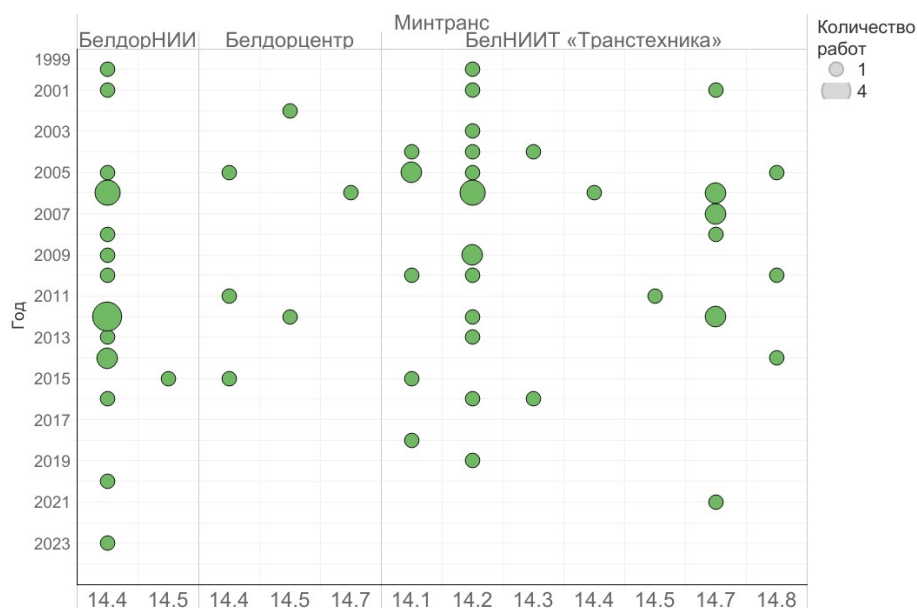


Рис. 3. НИОК(Т)Р в сфере обеспечения безопасности дорожного движения, выполненные предприятиями Минтранса (2000–2024 гг.)

Fig. 3. R&D projects in the field of road safety, conducted by enterprises of the Ministry of Transport (2000–2024)

Также следует отметить важную роль государственного предприятия «БелдорНИИ» в научно-технической деятельности, направленной на совершенствование дорожно-транспортной инфраструктуры (14.4), – 76 % от числа работ по указанному направлению. Всего за рассматриваемый период выполнено 20 НИОК(Т)Р, что составляет 16 % от общего числа работ в сфере обеспечения БДД.

При этом научная деятельность в сфере обеспечения БДД не является основным направлением ни для одного из предприятий Минтранса, если оценивать ее в процентах от общего количества НИОК(Т)Р зарегистрированных в Государственном реестре работ, выполненных данными предприятиями за 25 лет:

- для РУП «Белдорцентр» это 5 % (6 из 123 работ);
- для БелНИИТ «Транстехника» – 9 % (37 из 411 работ);
- для БелдорНИИ – 11 % (20 из 174 работ).

Среди вузов наибольшее число выполненных НИОК(Т)Р отмечено в БНТУ – 10 % от общего числа работ, основные направления науки в сфере обеспечения БДД – «транспортные средства» (14.1) и «организация дорожного движения» (14.5).

Анализируя количественные данные, представленные на рис. 1 и 2, можно говорить

о том, что есть направления, которые проработаны меньше других. В первую очередь, это касается получения широкой общественной поддержки (14.9). Единственная НИОК(Т)Р в данном направлении зарегистрирована в 2023 г., при этом в ней вопрос обеспечения БДД не является приоритетным.

Вторым по наименьшему количеству проведенных НИОК(Т)Р является направление «Иные участники дорожного движения (пешеходы, пассажиры, велосипедисты, лица, передвигающиеся на средствах персональной мобильности, и другие)» (14.3). Учитывая проблему обеспечения безопасности уязвимых участников движения в целом и возрастающую роль средств персональной мобильности и велосипедного движения в частности, а также характер связанных с этим вопросов, представляется своевременным и целесообразным проведение целого ряда НИОК(Т)Р по данной тематике. Это проблема является комплексной, требующей рассмотрения различных аспектов: правовых, организационных, инфраструктурных, технических, формирования государственной идеологии и общественной поддержки, т. е. институционального взаимодействия фактически по всем направлениям, выделенным в Концепции [2].

Анализируя данные, приведенные на рис. 1, также можно заметить общую тенденцию к снижению количества НИОК(Т)Р, начавшуюся в 2016 г. А в последние пять лет ежегодно регистрировалось в среднем всего по две научные работы. Среди предполагаемых причин этого процесса можно назвать следующие:

– разработка в групповой задаче положительного решения по конкретному мероприятию, соответствующего уровню требований на данном промежутке времени, и, как возможное следствие, окончание внутриведомственной заинтересованности в продолжении деятельности в данном направлении;

– возрастающие требования к НИОК(Т)Р, вызванные последовательными изменениями в государственной политике в области научной деятельности, с одновременным увеличением дефицита компетентности исполнителей;

– узкая специализация организаций-исполнителей при отсутствии внешней и внутриведомственной конкуренции, а также межведомственного взаимодействия.

Вместе с тем ряд экспертов уже фиксируют тренды, характеризующие ухудшающееся состояние БДД по количеству дорожно-транспортных происшествий, погибших и травмированных участников дорожного движения в последние пять лет [15]. Кроме того, они отмечают острую необходимость в отказе от узкокорпоративных интересов и призывают к взаимодействию и единой координации усилий по обеспечению БДД [15]. Таким образом, причины снижения активности научно-технической деятельности, возможно, носят неявный и более комплексный характер.

Рассматривая научно-техническую деятельность, связанную с обеспечением БДД, в среде научного сообщества (рис. 4), т. е. научные квалификационные работы, очевидно преобладание проблематики по «организации дорожного движения» (14.5) – 37 % (7 из 19 диссертаций). Другие вопросы по убыванию их отношения к общему количеству – «формирование государственной идеологии управления дорожным движением» (14.8) – 26 % (5 диссертаций из 19), «водители» (14.2) – 16 % (3 диссертации). При этом исходя из количества диссертационных работ, можно говорить о формировании институционального экспертного сообщества: ученые автодорожного факультета БНТУ и факультета управления процессами перевозок БелГУТ.

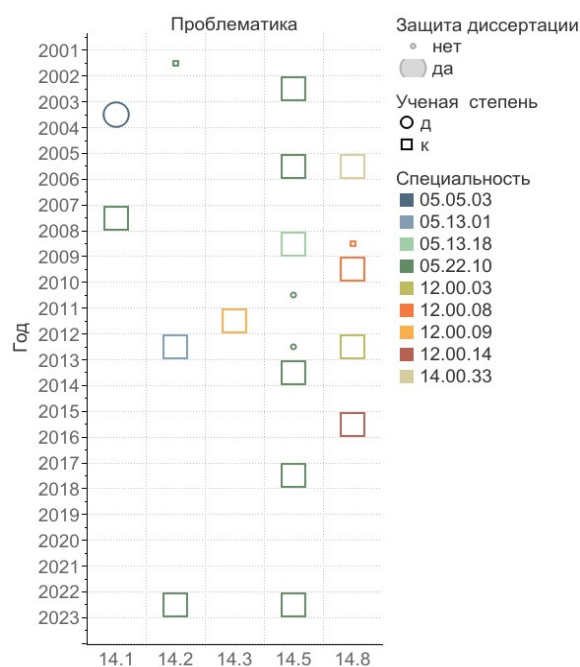


Рис. 4. Авторефераты диссертаций по проблемам обеспечения безопасности дорожного движения (2000–2024 гг.)

Fig. 4. Abstracts of dissertations on road safety issues (2000–2024)

Проблематика диссертаций (авторефератов) значительно отличается от НИОК(Т)Р, зарегистрированных в Государственном реестре. Отсутствуют работы по тематикам «Дорожно-транспортная инфраструктура» (14.4), «Интеллектуальные транспортные системы» (14.6), «Широкая общественная поддержка» (14.9), при объеме НИОК(Т)Р по данным направлениям 20, 10 и 2 % соответственно.

При этом по направлению «Обеспечение БДД» за 25 лет представлено 19 из 56¹ (35 %) авторефератов по дорожной деятельности в целом, т. е. почти каждая третья работа связана с данным научным направлением. С этой точки зрения, а также учитывая перечень конкретных направлений исследований (мероприятий), изложенных в Концепции [2], и фактически защищенных диссертаций, можно говорить о существовании неформализованной специальности «Обеспечение безопасности дорожного движения» в области технических наук в виде отдельного паспорта. Надо полагать, появление паспорта данной специальности будет способствовать научной деятельности в сфере БДД,

¹ Данные по авторефератам за период 2000–2024 гг. и другие, приведенные в настоящей публикации, размещены в открытом доступе – <https://public.tableau.com/app/profile/pavel.vavilau/viz/>.

формированию новых и совершенствованию существующих учебных программ в вузах, а также послевузовского образования, и, как следствие, внедрению более эффективных методов обеспечения безопасности движения в дорожную практику и жизнь белорусского общества.

ВЫВОДЫ

1. В результате настоящего исследования получены данные о количестве НИОК(Т)Р и авторефератов, посвященных проблеме обеспечения безопасности дорожного движения, выполненных в Республике Беларусь в период с 2000 по 2024 г. и классифицированных согласно групповым мерам Концепции [2]. Поставленная цель достигнута путем выявления основных направлений научно-технической деятельности и институционального вклада в каждое из них.

2. В результате поиска и анализа НИОК(Т)Р, зарегистрированных в Государственном реестре, установлена определяющая роль Минтранса в научно-технической деятельности, направленной на обеспечение безопасности дорожного движения, а также весомый вклад вузовской и академической науки. При этом дана количественная оценка классифицированным научным работам в институциональном разрезе. Кроме того, в результате проделанной работы выявлено наличие тенденции к снижению количества НИОК(Т)Р и приведены вероятные причины данного явления.

3. Анализ диссертационных исследований в сфере обеспечения БДД показал преобладание направления по «организации дорожного движения». При этом отмечено формирование институционального экспертного сообщества (автотракторный факультет БНТУ и факультет управления процессами перевозок БелГУТ) и существование неформализованной научной специальности «Обеспечение безопасности дорожного движения», подтверждаемое количеством и тематической направленностью научных работ.

4. Основными достоинствами подхода к оценке научно-технической деятельности в сфере БДД, изложенного в настоящей публикации, является возможность ретроспекции при современной постановке проблематики. Недостатки проявляются в смещении оценки, вызванной качеством подготовки и классификации исходных данных, а также в самом методе классификации, основанном на формальных признаках (название, предметное поле, ключевые слова), а не на сущностном анализе научных работ.

5. В дальнейшем проведенная работа может получить развитие путем анализа вклада каждого из направлений в количественные показатели, характеризующие состояние БДД, для определения эффективности выполненных работ и назначения перспективных первоочередных задач. Также результаты проделанной работы однозначным образом указывают на пробелы в научно-технической деятельности в вопросах, «принимаемых в отношении иных участников дорожного движения» и «направленных на получение широкой общественной поддержки», которые представляют собой актуальные и перспективные направления научной деятельности в формате межведомственного взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. О создании Постоянной комиссии по обеспечению безопасности дорожного движения при Совете Министров Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 05 апр. 2013 г. № 437 // Эталон. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2025.
2. О Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 22 мая 2023 г. № 329 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300329> (дата обращения: 18.10.2024).
3. Об утверждении Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 14 июня 2006 г. № 757 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: [https://pravo.by/pdf/2006-94/2006-94\(021-026\).pdf](https://pravo.by/pdf/2006-94/2006-94(021-026).pdf) (дата обращения: 18.10.2024).
4. О государственной программе «Дороги Беларуси» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 09 апр. 2021 г. № 212 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100212> (дата обращения: 18.10.2024).
5. Об утверждении Государственной программы по развитию и содержанию автомобильных дорог в Республике Беларусь на 2017–2020 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь 18 сент. 2017 г. № 699 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21700699> (дата обращения: 18.10.2024).
6. Об основах государственной научно-технической политики: Закон Респ. Беларусь, 19 янв. 1993 г. № 2105-XII 212 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19302105> (дата обращения: 18.10.2024).
7. О мерах по повышению безопасности дорожного движения: Указ Президента Респ. Беларусь 28 нояб. 2005 г. № 551 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: [https://pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2005-189/2005-189\(007-070\).pdf&oldDocPage=1](https://pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2005-189/2005-189(007-070).pdf&oldDocPage=1) (дата обращения: 18.10.2024).

8. Безопасность автомобильных дорог: ТР ТС 014/2011. Введ. 15.02.2015. Принят Решением Комиссии Таможенного союза от 18 окт. 2011 г. № 827 с учетом Решения Комиссии Таможенного союза от 9 дек. 2011 г. № 859. URL: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/8d3/P_827_1.pdf (дата обращения: 18.10.2024).
 9. О безопасности дорожного движения: федеральный Закон Рос. Федерации от 10 дек. 1995 № 196-ФЗ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/8592> (дата обращения: 18.10.2024).
 10. О дорожном движении: Закон Респ. Беларусь от 5 янв. 2008 г. № 313-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10800313> (дата обращения: 18.10.2024).
 11. Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности: Закон Республики Беларусь, 2 декабря 1994 г. № 3434-XII. URL: <https://www.mintrans.gov.by/uploads/files/Zakon-ob-avtomobilnyx-dorogax.doc> (дата обращения: 18.10.2024).
 12. Государственный реестр научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ // БелИСА. URL: <http://webiis.belisa.org.by/reestr/>. Дата доступа: 18.10.2024.
 13. О государственной регистрации научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ: Указ Президента Респ. Беларусь от 25 мая 2006 г. № 356 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=p30600356> (дата обращения: 18.10.2024).
 14. Электронный каталог Национальной библиотеки Беларуси. Режим доступа: <https://e-catalog.nlb.by/>. Дата доступа: 18.10.2024.
 15. Концепция безопасности дорожного движения в Республике Беларусь / Д. В. Канский, С. В. Богданович, Е. Н. Кот, Л. В. Хмельницкая // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 2. С. 163–171. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-163-171>.
- Поступила 12.12.2024
Подписана в печать 07.07.2025
Опубликована онлайн 30.09.2025
1. On the Establishment of the Standing Commission for Road Safety under the Council of Ministers of the Republic of Belarus [Electronic resource]: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated 05.04.2013 No 437 // Etalon Legal System. Legislation of the Republic of Belarus / *National Center for Legal Information of the Republic of Belarus*. Minsk, 2025 (in Russian).
 2. On the Concept of Ensuring Road Safety in the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated May 22, 2023. No. 329. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300329> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 3. On Approval of the Concept of Ensuring Road Safety in the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated June 14, 2006. No. 757. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: [https://pravo.by/pdf/2006-94/2006-94\(021-026\).pdf](https://pravo.by/pdf/2006-94/2006-94(021-026).pdf). (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 4. On the State Program “Roads of Belarus” for 2021–2025: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated April 09, 2021. No. 212. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100212> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 5. On Approval of the State Program for the Development and Maintenance of Highways in the Republic of Belarus for 2017–2020: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated September 18, 2017. No. 699. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21700699>. (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 6. On the Fundamentals of State Scientific and Technical Policy: Law of the Republic of Belarus, January 19, 1993. No. 2105-XII 212. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19302105> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 7. On Measures to Improve Road Safety: Decree of the Pre-sident of the Republic of Belarus dated November 28, 2005. No 551. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: [https://pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2005-189/2005-189\(007-070\).pdf&oldDocPage=1](https://pravo.by/document/?guid=2012&oldDoc=2005-189/2005-189(007-070).pdf&oldDocPage=1) (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 8. ТР ТС 014/2011. *Road Safety*. Available at: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/8d3/P_827_1.pdf (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 9. *On Road Safety: Federal Law of the Russian Federation*, 10.12.1995 N 196-ФЗ. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/8592> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 10. *On Road Traffic: Law of the Republic of Belarus*, January 5, 2008. № 313-З. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10800313> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 11. *On Highways and Road Activities: Law of the Republic of Belarus*, December 2, 1994. № 3434-XII. Available at: <https://www.mintrans.gov.by/uploads/files/Zakon-Ob-avtomobilnyx-dorogax.doc> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 12. *State Register of Research, Development, and Experimental Technological Work*. Available at: <http://webiis.belisa.org.by/reestr/> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 13. On State Registration of Research, Development, and Experimental Technological Work: Decree of the President of the Republic of Belarus dated May 25, 2006. No. 356. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=p30600356> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 14. Electronic Catalog of the National Library of Belarus. Available at: <https://e-catalog.nlb.by/> (accessed 18 October 2024) (in Russian).
 15. Kapski D. V., Bogdanovich S. V., Kot E. N., Khmelnit-skaya L. V. (2024) Road Safety Concept in the Republic of Belarus. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23 (2), 163–171. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-163-171> (in Russian).
- Received: 12.12.2024
Accepted: 07.07.2025
Published online: 30.09.2025

REFERENCES

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-411-420>

УДК 331.101.68

Формирование инвестиционного потенциала научно-промышленного комплекса: от теории роста к направлениям развития

Канд. экон. наук, доц. И. В. Устинович¹⁾, докт. экон. наук, проф. О. В. Калинина²⁾,
кандидаты экон. наук, доценты Н. С. Лукашевич²⁾, Н. С. Алексеева²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Реферат. Анализ основных теорий и моделей роста позволил обосновать инновации и инвестиции в качестве системообразующих факторов устойчивого экономического развития, а оценка истории становления белорусской государственности на современном этапе – выявить основные направления развития ее экономики (диверсификация, привлечение иностранных инвестиций, развитие человеческого капитала, реформирование государственного промышленного сектора, социальная защита и справедливость). Проведена оценка отношений между государством и рынком, формирующая уровень взаимодействия органов государственного управления с научными и промышленными организациями за период с момента становления белорусской государственности на современном этапе ее развития до настоящего времени. Проведенный анализ текущего состояния отдельных индикаторов оценки и способов использования различных рычагов механизма государственного управления, оценки динамики ключевых показателей развития научно-промышленного комплекса в России, а также изучение зарубежного опыта позволили выработать предложения по перспективным направлениям государственной политики в области привлечения инвестиций для реализации программы развития научно-промышленного комплекса. Настоящее исследование направлено на определение условий и форм привлечения инвестиций для формирования и развития научно-промышленного комплекса (НПК) с учетом текущих экономических реалий Республики Беларусь, оценку потенциала государственной инвестиционной политики и выработку практических рекомендаций. В качестве задач исследования выделяются: анализ динамики инновационного развития, выявление препятствий к формированию эффективного НПК, а также сопоставление национальной практики с международным опытом.

Ключевые слова: инновационное развитие, научно-промышленный комплекс, отношение между государством и рынком

Для цитирования: Устинович, И. В. Формирование инвестиционного потенциала научно-промышленного комплекса: от теории роста к направлениям развития / И. В. Устинович [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 411–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-411-420>

Formation of the Scientific-Industrial Complex Investment Potential: From Growth Theory to Development Directions

I. V. Ustinovich¹⁾, O. V. Kalinina²⁾, N. S. Lukashevich²⁾, N. S. Alekseeva²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The analysis of the main growth theories and models has justified innovations and investments as the systemic factors of sustainable economic development. The evaluation of the Belarusian statehood formation history at the present stage

Адрес для переписки

Устинович Ирина Валерьевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-77-96
ustinovich@bntu.by

Address for correspondence

Ustinovich Irina Valerievna
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: 375 17 292-77-96
ustinovich@bntu.by

has identified the main directions for the development of its economy (diversification, attracting foreign investments, developing human capital, reforming the state industrial sector, social protection, and justice). An assessment of the relations between the state and the market, which form the level of interaction of state administration bodies with scientific and industrial organizations for the period from the formation of the Belarusian statehood at the present stage of its development to the present day, has been carried out. The conducted analysis of the current state of individual assessment indicators and methods of using various levers of the public administration mechanism, assessment of the dynamics of key indicators of the development of the scientific-industrial complex (SIC) in Russia, as well as the study of foreign experience made it possible to develop proposals for promising areas of state policy in the field of attracting investments for the implementation of the program for the development of the scientific and industrial complex. The study is aimed at determining the conditions and forms of attracting investments for the formation and development of the SIC, considering the current economic realities of the Republic of Belarus, assessing the potential of the state investment policy and developing practical recommendations. The objectives of the study include: analysis of the dynamics of innovative development, identification of obstacles to the formation of an effective SIC, as well as comparison of national practice with international experience.

Keywords: innovative development, scientific-industrial complex, relations between the state and the market

For citation: Ustinovich I. V., Kalinina O. V., Lukashevich N. S., Alekseeva N. S. (2025) Formation of the Scientific-Industrial Complex Investment Potential: From Growth Theory to Development Directions. *Science and Technique*. 24 (5), 411–420. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-411-420> (in Russian)

Введение

В условиях изменяющейся мировой политико-экономической среды и финансовых вызовов (пандемия, санкционное давление, процессы деглобализации) главным направлением государственной политики должно стать обеспечение надежности и устойчивости национальной экономики. Необходимость модернизации и инновационного развития может выступать внутренним двигателем для привлечения дополнительных инвестиций в качестве инструмента финансирования проектов и стимулирования экономического роста, а успешное решение внутренних и внешних проблем, стоящих перед государством, – одним из факторов модернизации и инновационного развития. К механизмам стимулирования инвестиционной активности можно отнести развитие стартап-движения, поддержку исследований и разработок, а также создание специальных инвестиционных программ. Данным исследованием определены ключевые задачи, заключающиеся в выработке предложений по формированию и дальнейшему развитию научно-промышленного комплекса и перспективным направлениям государственной политики в области привлечения инвестиций на основе оценки научного задела и исторических предпосылок, потенциала использования различных рычагов механизма государственного управления.

Основная часть

Научное сообщество продуктивно изучает влияние инвестиций на экономическое развитие и инновационную активность. С конца 1950-х гг. в экономической науке получила широкое распространение концепция экзогенного технологического прогресса, сформированная в русле неоклассической теории. Основы этой концеп-

ции были заложены в трудах Р. Солоу, Р. Харрода, Дж. Р. Хикса и других исследователей. Несмотря на значительные теоретические усилия, научно-технический прогресс в рамках неоклассических моделей трактовался, как правило, обобщенным фактором производственной функции наряду с трудом и капиталом, но без четкого раскрытия его внутренней структуры и механизмов воздействия.

Эндогенные модели роста возникли как ответ на ограничения неоклассической модели Р. Солоу, в которой технологический прогресс рассматривался как внешний (экзогенный) фактор. Одним из первых значительных вкладов в это направление стала модель П. Ромера (1986), в которой технологический прогресс объясняется инвестициями в человеческий капитал, а также в знания и НИОКР. В модели П. Ромера рост становится результатом целенаправленной деятельности экономических агентов по накоплению знаний, что делает его внутренне обусловленным [1].

Более поздние модели, развившиеся во второй половине 1990-х гг., сосредоточились на структурном анализе технологических изменений и процессе создания инноваций. Наиболее известной является модель А. Агьона и П. Ховитта [2], основанная на механизме «созидательного разрушения» И. Шумпетера. В этой модели рост обусловлен последовательностью технологических новшеств, каждая из которых замещает предыдущую технологию, что приводит к повышению общей производительности. Инновации в этой теории возникают в результате деятельности фирм, стремящихся к монопольной прибыли через разработку новых продуктов и технологий. Такие модели акцентируют внимание на институциональных и рыночных условиях, необходимых для эффективной реализации инновационного потенциала, а также

на взаимодействии между научно-исследовательскими институтами, фирмами и государством.

Другим важным примером является модель Р. Лукаса [3], в которой центральную роль играет человеческий капитал: его накопление способствует повышению производительности и соответственно устойчивому росту. Оба подхода делают акцент на поведенческих параметрах и решениях агентов, таких как склонность к обучению, сбережению и инвестированию в образование.

На современном этапе развития экономической науки теория роста значительно эволюционировала, вобрав в себя достижения не только эндогенных моделей, но и идеи из смежных дисциплин: институциональной экономики, экологической экономики, экономики знаний, цифровой трансформации и др.

Таким образом, экономисты пришли к пониманию, что инвестиции и инновации – это не просто внешние стимулы, а внутренние системообразующие факторы устойчивого экономического роста, эффективность которых зависит от поведения участников, институциональной среды и взаимодействия науки, бизнеса и государства.

Дальнейшее устойчивое экономическое развитие возможно путем взаимодействия органов государственного управления, научных и промышленных организаций в рамках научно-промышленного комплекса в качестве инструмента ускорения научно-технического прогресса и обеспечения технологического суверенитета. В целях данного исследования определим, что научно-промышленный комплекс (НПК) – это «имущественный комплекс, включающий в себя совокупность институтов и инфраструктуру, регулируемый государством и создающий новые цепочки стоимости продукции, за счет перераспределения потоков ресурсов» [4, с. 31]. НПК как организационно-управленческая и институциональная конструкция, формируемая на уровне государственной научно-промышленной политики, находит свое выражение в: госпрограммах развития науки и технологий, кластерных стратегиях, национальных проектах и инновационных платформах.

Вместе с тем в контексте инновационного развития Республики Беларусь остаются недостаточно исследованными вопросы институционального обеспечения научно-промышленного комплекса и стратегий взаимодействия между государством и бизнесом. Отличительной особенностью настоящего исследования является его формирование на основе анализа текущего состо-

яния и потенциала использования различных рычагов механизма государственного управления в сфере инвестиционного регулирования, а также изучения зарубежного опыта.

Вопросам влияния инвестиций на экономическую активность и инновационное развитие посвящены публикации иностранных ученых [5–7]. Нобелевский лауреат по экономике Пол Ромер (Paul Romer) в своих работах затрагивал вопросы экономического роста и инноваций. Его исследования дают представления о том, как инвестиции и стабильность могут воздействовать на научно-технический прогресс. Однако малоизученным остается вопрос выбора эффективных мер построения партнерских отношений между государством и рынком для привлечения инвестиций на реализацию программ развития научно-промышленного комплекса. Для этого необходимо: оценить состояние научно-промышленного комплекса; определить влияние уровня взаимодействия государства и бизнеса на перспективы модернизации и инновационного развития; через изучение международного опыта выработать предложения по перспективным направлениям государственной политики.

Проследим историю становления белорусской государственности на современном этапе ее развития и опишем периодизацию отношений между государством и рынком. После распада Советского Союза в 1991 г. Республика Беларусь стала независимым государством с хорошими стартовыми экономическими показателями. Ощущая необходимость преобразования своей экономической системы, органы государственного управления Республики Беларусь предприняли шаги по либерализации экономики, проводя массовую приватизацию и либерализацию цен. Однако глубокий социально-экономический кризис, который охватил Беларусь в этот период, привел к пересмотру стратегии развития. После 1994 г. руководством страны обоснованно было принято решение об отказе от политики либерализации в пользу построения социально ориентированной рыночной модели экономики.

Этот переход включал в себя более активное государственное вмешательство в экономику, поддержку социальных программ и предприятий, а также сохранение контроля над ключевыми для развития страны отраслями.

Такой поворот в экономической политике был обусловлен стремлением смягчить негативные социальные последствия кризиса и предоставить гражданам определенные гарантии социальной стабильности. Эти изменения

в экономической стратегии помогли нам сохранить все основные элементы социальной защиты населения, несмотря на сложности, с которыми Республика Беларусь сталкивалась в переходный период после распада Советского Союза. Социально-экономическая политика Беларуси в тот период характеризовалась доминирующим присутствием государства в сельском хозяйстве, промышленности и сфере услуг, ограниченным частным сектором и низким притоком прямых иностранных инвестиций (ПИИ). Однако через пять лет после провозглашения независимости ВВП на душу населения снизился на 25 % по сравнению с уровнем 1991 г. (1899 дол. США в 1991 г. и 1436 дол. США в 1996 г.) и остро проявились другие кризисные явления.

1994–2000 гг. характеризуются формированием новой экономической стратегии, призванной преодолеть кризисные явления, обусловленные развалом Советского Союза и, как следствие, нарушением существующих хозяйственных связей между белорусскими предприятиями и предприятиями бывшего СССР, которые к тому же стали иностранными. Данная стратегия предполагала преобразования в ключевых направлениях экономического развития того периода: реформы в промышленности (приватизация некоторых предприятий; появление и развитие частной, кооперативной, а также смешанной форм собственности; децентрализация управления предприятиями; внедрение рыночных механизмов; развитие кооперации; поиск новых рынков сбыта и партнеров); развитие сельского хозяйства (государственная поддержка аграрного сектора с целью укрепления продовольственной безопасности); стимулирование внешнеэкономической деятельности.

Начало этого периода ознаменовано существенным снижением основных социально-экономических показателей. Так, в 1994 г. объем ВВП снизился почти на 30 %, объем производства – на 33 %, а капитальные вложения упали почти в два раза по сравнению с 1990 г. Однако потенциал применения основных инструментов механизма развития экономики в этот период (политика денежной экспансии, жесткое регулирование ценообразования) исчерпал себя, что потребовало поиска точек роста экономики посредством формирования новых отношений между государством и рынком. Этот процесс ускорил мировой экономический кризис 1998 г., который коснулся и Республики Беларусь, и особенно России, как основного стратегического партнера нашей страны.

Принцип опоры на собственные силы из-за сложившихся политико-экономических условий (низкий уровень привлеченных иностранных инвестиций, отсутствие значительного государственного долга) при высокой внешне-торговой квоте (экспорт плюс импорт) на уровне 116–119 % ВВП, т. е. ориентация на собственные ресурсы и конкурентные преимущества предопределили становление белорусской экономической модели.

В таких исторических условиях объективно возрастает роль государства. В стране выстроена управляемая система государственной власти и регулирования. В результате идея «социального государства» была дополнена новой парадигмой сильного и «эффективного государства». Основными направлениями развития экономики Республики Беларусь являются:

1) диверсификация экономики: поиск и сосредоточение усилий в свободных рыночных нишах – на развитии инноваций, информационных технологий, сферы услуг и других перспективных отраслей;

2) привлечение иностранных инвестиций: создание благоприятного инвестиционного климата, улучшение условий для бизнеса, снижение административных барьеров и повышение прозрачности экономических процессов;

3) развитие человеческого капитала: усиление инвестиций в образование и науку, а это будет способствовать инновационному развитию и повышению производительности;

4) реформа государственного промышленного сектора: совершенствование управления государственными предприятиями, повышение их эффективности и ответственности, формирование государственных корпораций;

5) социальная защита и справедливость: эффективные механизмы социальной поддержки, борьба с неравенством, доступность качественных услуг здравоохранения и образования, а также развитие социального предпринимательства.

Начиная с 2012 г. в структуре ПИИ в экономике Беларуси преобладают инвестиции в виде реинвестирования прибыли. По состоянию на середину 2022 г., объем иностранных инвестиций в промышленность составлял более 43,1 % всех прямых иностранных инвестиций, в то время как объем прямых иностранных инвестиций в третичный сектор составлял лишь около 20 %. Кроме того, иностранные инвестиции в Республике Беларусь в основном распределяются в столице и прилегающих районах. Как страна с развитой промышленностью Республика Беларусь сталкивается со множеством

проблем, которые неизбежны в процессе экономического развития. Население Республики Беларусь относительно невелико. Хотя затраты на рабочую силу невысоки, иностранные инвестиции требуют наличия большого количества факторов производства в принимающей стране, а отсутствие качественных и количественных характеристик фактора рабочей силы напрямую снижает интерес и мотивацию иностранного капитала вкладывать прямые инвестиции в экономику Республики Беларусь. Превалирующая доля иностранных инвестиций, привлекаемых в Республику Беларусь, используется для приобретения основных средств, в то время как иностранные инвестиции в производственные технологии и услуги очень малы по объему и количеству. Белорусские предприятия имеют очевидную технико-технологическую отсталость от ведущих стран мира, следовательно, их техническое перевооружение зачастую напрямую зависит от иностранных инвестиций.

Республика Беларусь создает привлекательные условия странам мира для инвестирования в белорусскую экономику. Нормативно-правовые акты и положения об иностранных инвестициях постоянно совершенствуются. В 2024 г. вступила в силу новая редакция Закона Республики Беларусь от 12.07.2013 № 53-З «Об инвестициях», который включает значительные новшества, в том числе институт специальных инвестиционных договоров, аналог офсетных договоров. Во-вторых, Республика Беларусь как индустриальная страна с малой открытой экономикой имеет сравнительные конкурент-

ные преимущества в области машиностроения и граничит с Россией – крупной индустриальной державой, что предполагает интенсивное развитие всех форм сотрудничества в условиях политико-экономических санкций коллективного Запада относительно наших стран. Особенно актуальным становится поощрение взаимных инвестиций между двумя странами как стратегическими партнерами. Как ранее, так и в новых условиях Республика Беларусь проводит селективную торгово-инвестиционную политику, направленную на активизацию инвестиционного и торгового сотрудничества прежде всего с Российской Федерацией, используя географическую близость между странами. В-третьих, национальная экономика Беларуси стабильно растет, что обеспечивает предприятиям значительную автономию и устойчивое развитие за счет внутреннего спроса. Дальнейшее развитие потребует комплексного подхода, долгосрочной стратегии и сотрудничества между государственными органами, предпринимательским сектором и обществом в целом. Однако первоначально необходимо определить текущее состояние уровня развития отношений между государством и рынком.

В настоящее время научно-промышленный комплекс в Республике Беларусь не сформирован в качестве отдельного института [8], однако оценить его состояние представляется возможным через анализ показателей инновационного развития промышленных и научных организаций (табл. 1).

Таблица 1

Динамика показателей инновационного развития промышленных и научных организаций
Dynamics of indicators of innovative development of industrial and scientific organizations

Показатель, %	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Сравниваемое значение	Стандартное отклонение	Вариация
Темпы роста организаций, потративших средства на инновации	98,6	101,7	112,0	107,5	105,4	98,7	100,0	103,4	5,1	4,9
Удельный вес организаций, осуществлявших затраты на инновации, в общем числе обследованных организаций	21,1	21,6	22,0	21,1	20,6	19,7	20,0	20,9	0,8	4
Доля отгруженной инновационной продукции (работ, услуг) в общем объеме отгруженной продукции (работ, услуг) организациями промышленности	16,3	17,4	18,6	16,6	17,9	19,8	17,7	17,8	1,2	6,7
Темп роста количества научно-исследовательских организаций	98,2	105,3	100,2	101,1	98,0	98,7	100,7	100,3	2,5	2,5
Темп роста количества сотрудников, занимающихся исследованиями и разработками	99,2	102,1	103,5	101,2	92,4	100,1	98,4	99,5	3,6	3,6
Источник: собственная разработка на основе официальной статистики Республики Беларусь.										

Исходя из данных табл. 1, можно отметить следующие тенденции: все показатели отличаются слабой вариабельностью значений; средние темпы роста организаций, потративших средства на инновации, превышают темпы роста количества научно-исследовательских организаций (компании, активно внедряющие инновации, демонстрируют более высокие темпы развития по сравнению с организациями, фокусирующимися только на научных исследованиях); количество сотрудников, занимающихся исследованиями и разработками, в среднем снизилось на 0,5 %; в среднем каждая пятая организация в стране осуществляла затраты на технологические инновации (это указывает на довольно широкое распространение практики инвестирования в технологические инновации среди организаций, обусловленное в том числе налоговыми льготами).

Анализируя экономические стратегии развития Российской Федерации начиная с распада СССР можно выделить четыре этапа:

- этап рыночных реформ (1992–1998 гг.; массовая ваучерная приватизация, высокая инфляция, спад производства, падение уровня жизни и, как следствие, дефолт 1998 г.);

- этап восстановления и роста (1999–2008 гг.; модернизация экономики, налоговая реформа, укрепление вертикали власти, национальные проекты, усиление роли топливно-энергетического комплекса и, как следствие, рост ВВП, снижение бедности, создание Стабфонда);

- этап институциональной модернизации и госкорпораций (2008–2013 гг.; Концепция долгосрочного социально-экономического развития, стратегия инновационного развития РФ, укрепление госкорпораций (Росатом, Ростех, «Сколково»), активизация институтов развития (ВЭБ, РВК, Фонд содействия инновациям), развитие в основном базируется на доходах от экспорта сырья);

- этап адаптации к санкциям и импортозамещения (2014 г. – н. в.; политика импортозамещения в промышленности и сельском хозяйстве, поддержка стратегических отраслей; активизация внешнеэкономического сотрудничества с Азией, усиление роли государства в экономике, рост доли госпредприятий, программа антикризисной поддержки населения и бизнеса, ускорение цифровизации, рост ВВП через госзаказ и создание «технологических суверенитетов», акцент на устойчивость и внутреннюю технологическую базу).

В Российской Федерации политика поддержки научно-промышленного комплекса

опирается на целый ряд программ и институтов развития, среди них – национальные проекты «Наука и университеты», «Цифровая экономика» и т. д.; с 2025 г. начинают действовать новые национальные проекты, нацеленные на развитие ключевых сфер жизни общества и государства (программы Фонда содействия инновациям, Фонда инфраструктурных и образовательных программ, «Сколково», а также деятельность Российского фонда прямых инвестиций). Развиваются технопарки, промышленные парки, специальные экономические зоны. В ряде научных публикаций обосновывается целесообразность формирования научно-промышленных комплексов как одного из инструментов преодоления системных ограничений, препятствующих реализации экономического, научного и инновационного потенциала промышленности. К числу таких ограничений относятся несоответствие директивных методов планирования потребностям инновационного развития, институциональная разобщенность науки и производства, а также снижение объемов инвестиций в процессы модернизации промышленных предприятий и производственных-технологических комплексов [9].

Таким образом, можно утверждать, что начиная с 2014 г. под влиянием санкционного давления и геополитических ограничений Россия активизировала политику импортозамещения, усилила поддержку НИОКР и высокотехнологичных производств. Создаются технопарки, промышленные и особые экономические зоны, формируются инновационные кластеры. Беларусь в аналогичный период также столкнулась с необходимостью адаптации к санкционным рискам, однако институциональное оформление научно-промышленного комплекса как инструмента инновационного развития промышленности пока остается на начальной стадии. На фоне сравнительно низкого уровня вложений в НИОКР (в среднем 0,48 % ВВП за 2016–2022 гг.) и ограниченного инновационного экспорта (доля высокотехнологичных производств в промышленности – около 3,4 %) страна демонстрирует существенно меньшую инновационную активность по сравнению с Российской Федерацией.

Изучим динамику показателей, характеризующих потенциал формирования научно-промышленного комплекса Республики Беларусь. Анализ показал наличие потенциала прямого взаимодействия между научными и производственными организациями (табл. 2).

Таблица 2

Динамика показателей формирования научно-промышленного комплекса
Dynamics of indicators in the formation of the scientific-industrial complex

Показатель, %	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Сравнимое значение	Стандартное отклонение	Вариация
Индекс производительности труда	99,4	103,7	103,5	101,7	99,8	103,2	96,6	101,1	2,6	2,6
Степень износа основных средств	36,6	37,8	38,8	40,4	40,7	40,7	41,5	39,5	1,8	4,6
Доля высокотехнологичных производств в структуре промышленного производства	2,9	3,0	2,8	2,8	3,3	3,1	3,4	3,0	0,2	7,8
Научоемкость ВВП	0,50	0,58	0,60	0,58	0,54	0,46	0,48	0,5	0,1	10,3
Удельный вес средне- и высокотехнологичных производств в структуре добавленной стоимости обрабатывающей промышленности	37,6	38,0	40,6	40,4	37,4	40,4	39,4	39,1	1,4	3,6
Источник: собственная разработка на основе официальной статистики Республики Беларусь.										

Исходя из данных табл. 2, можно отметить следующие тенденции: наибольшую вариативность значений показывает науоемкость ВВП (весь анализируемый период она находится на критически низком уровне, а в 2022 г. даже снизилась относительно среднего значения); можно отметить рост среднего уровня производительности труда, однако темпы роста реальной заработной платы превышают темпы роста производительности труда; растет доля высокотехнологичных производств в структуре промышленного производства.

Увеличение доли высокотехнологичных отраслей может способствовать экономическому росту в долгосрочной перспективе. Оценивать научно-промышленный комплекс Республики Беларусь предлагается также исходя из ее позиции в мировых индексах. Глобальный инно-

вационный индекс (Global Innovation Index, GII) был инструментом, созданным совместно Всемирной организацией интеллектуальной собственности (ВОИС) и американским институтом INSEAD. Глобальный инновационный индекс измеряет инновационные возможности и результаты более чем 130 стран по ряду критериев, таких как инновации в бизнесе, инфраструктура и институты, инвестиции в исследование и разработки, высшее образование и другие факторы, влияющие на инновационное развитие. Входной индекс характеризует потенциальный ресурсный уровень инновационной деятельности в стране, а выходной – уровень достигнутых результатов. В табл. 3 проводится анализ инновационного развития Республики Беларусь согласно данным глобального инновационного индекса GII¹.

Таблица 3

Динамика позиций Республики Беларусь в рейтинге глобального инновационного индекса
Dynamics of the Republic of Belarus's position in the Global Innovation Index ranking

Индекс	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Сравнимое значение	Стандартное отклонение	Вариация
Входной	64	63	60	50	67	68	86	65	10	15
Выходной	103	109	110	95	61	62	63	86	21	25
Глобальный инновационный	79	88	86	72	64	62	77	75	9	12
Источник: собственная разработка на основе данных глобального инновационного индекса.										

¹ Global Innovation Index URL: <https://www.globalinnovationindex.org/Home>.

До 2019 г. Республика Беларусь демонстрировала лучшие показатели по вкладу в инновации, чем по результатам. Начиная с 2020 г. она выглядит лучше по результатам инновационной деятельности, чем по инновационным вложениям. Несмотря на снижение в 2022 г. позиции Республики Беларусь в Глобальном индексе инновационного развития по сравнению с 2021 г., индекс республики остался выше, чем в 2016 г. При анализе составных показателей, которые входят в расчет глобального инновационного индекса, эксперты выделяют сильные стороны нашей страны: человеческий капитал, научно-исследовательскую деятельность, разработку технологий. Наибольшая доля ПИИ сосредоточена в Минске и прилегающих районах, что указывает на сильную региональную диспропорцию. Иностранные инвестиции преимущественно направлены на приобретение основных средств, в то время как вложения в технологии и услуги остаются низкими. Отсутствие полноценной институциональной базы взаимодействия науки и промышленности снижает эффективность развития НПК. Для сравнения представим анализ динамики ключевых показателей развития НПК в России в 2016–2022 гг. (табл. 4).

Как видно, Россия удерживает устойчивые позиции в области наукоемкости и технологического экспорта, демонстрируя плавный рост инновационной активности и стабильное положение в международных рейтингах. Беларусь характеризуется меньшим объемом инвестиций в НИОКР (в среднем 0,48 % ВВП за 2016–2022 гг.) и существенно более низкими показателями инновационного экспорта. Доля высокотехнологичных производств в структуре промышленности в Беларуси составляет 3,4 %, тогда как в России – около 6,8 %. В ГИП Беларусь занимает 77-е место, уступая России более чем на 30 позиций. Россия демонстрирует более высокие результаты в развитии научно-промышлен-

ного комплекса благодаря широкой институциональной базе, стабильному финансированию НИОКР и активной поддержке со стороны государства.

Россия стабильно инвестирует в исследования и разработки (в среднем 1,08 % ВВП), имеет более развитую инфраструктуру научно-технической кооперации и удерживает устойчивые позиции в глобальных рейтингах инновационного развития (средняя позиция в ГИП – 46-е место против 75-го у Республики Беларусь). Следовательно, белорусской экономике необходимо активизировать институциональные реформы в области инвестиционной и научно-промышленной политики, заимствуя успешные практики, апробированные в Российской Федерации, особенно в части регионального перераспределения инвестиций, расширения инструментов государственно-частного партнерства и развития инновационных кластеров. Зарубежный опыт (ЕС, США, РФ) [10] демонстрирует успешные модели НПК при наличии таких условий, как: институционализация научно-промышленных кластеров; поддержка совместных НИОКР; преференции в налогообложении и доступе к инфраструктуре; синергия государства, науки и бизнеса. Для Беларуси целесообразно: усилить региональную политику перераспределения инвестиций; внедрить механизмы оценки эффективности НПК; стимулировать государственно-частное партнерство в наукоемких отраслях; развивать образовательные и цифровые платформы взаимодействия.

Одновременно с достигнутыми успехами при формировании социально ориентированной рыночной экономики в Беларуси необходимо решить ряд первоочередных проблем и разработать комплекс предложений, которые будут основываться в том числе и на усилении национальной валюты как источника дополнительных инвестиций (табл. 5).

Таблица 4

Ключевые показатели развития НПК в России в 2016–2022 гг.
Key indicators of the SIC development in Russia in 2016–2022

Показатель, %	2016 г.	2020 г.	2022 г.	Сравнимое значение	Стандартное отклонение	Вариация
Инвестиции в НИОКР, % ВВП	1,10	1,03	1,10	1,08	0,04	3,75
Доля инновационно-активных предприятий, %	9,3	10,1	11,20	10,20	0,95	9,35
Наукоемкость ВВП, %	1,09	1,01	1,12	1,07	0,06	5,30
Доля высокотехнологичной продукции в экспорте, %	16,30	20,5	22,10	19,63	3,00	15,26
Позиция в Global Innovation Index	43	47	47	46	2,31	5,06

Источник: собственная разработка на основе официальной статистики Российской Федерации.

Таблица 5

**Предложения по перспективным направлениям государственной политики
в привлечение дополнительных инвестиций**
Proposals for promising directions of state policy in attracting additional investments

Предложение	Путь реализации
Повышение устойчивости экономики	Стабильная макроэкономическая политика, включая умеренную инфляцию и устойчивый рост ВВП, способствует привлечению инвестиций. Проведение реформ, направленных на укрепление фискальной и монетарной политики, с целью предотвращения кризисов и колебаний валютного курса
Прозрачность финансовых операций	Улучшение системы финансовой отчетности и аудита для обеспечения прозрачности финансовых операций. Развитие законодательства и надзора, направленных на предотвращение манипуляций на валютных рынках
Содействие использованию национальной валюты	Развитие финансовой инфраструктуры для облегчения проведения операций в национальной валюте
Монетарная политика	Мониторинг и реагирование на изменения в мировой экономике и финансовых рынках с целью предотвращения кризисов валютного рынка
Образование и информирование	Проведение образовательных кампаний для населения о важности национальной валюты и ее роли в экономике. Обеспечение доступа к информации о финансовой стабильности и перспективах национальной валюты
Сотрудничество с международными партнерами	Работа с международными финансовыми институтами и партнерами для поддержания стабильности и доверия к национальной валюте. Развитие мер по предотвращению финансовых кризисов и поддержанию долгосрочных договоренностей с зарубежными инвесторами
Источник: разработка автора.	

Развитие научно-промышленного комплекса Беларуси требует системного подхода к инвестиционной политике. Обеспечение макроэкономической стабильности, поддержка инновационной активности и институциональное оформление взаимодействия науки и производства являются ключевыми условиями для привлечения как внутренних, так и внешних инвестиций. Предложенные меры позволят обеспечить устойчивость экономического роста, модернизацию производства и укрепление конкурентных позиций страны на международной арене.

ВЫВОДЫ

1. Развитие научно-промышленного комплекса требует масштабной и устойчивой инвестиционной поддержки, способной обеспечить финансирование научных исследований, внедрение разработок, модернизацию производственной базы и развитие кооперационных связей между участниками. Для этого необходимо соблюдение ряда институциональных, экономических и организационных условий, а также применение разнообразных форм привлечения инвестиций.

2. Формирование научно-промышленных комплексов представляется перспективным

направлением для преодоления институциональных и инвестиционных барьеров, сдерживающих развитие промышленного сектора Республики Беларусь и России. Интеграция науки и производства в рамках таких комплексов может способствовать более эффективному использованию инновационного и научно-технического потенциала. Необходим пересмотр подходов к планированию и управлению инновационной инфраструктурой с акцентом на создание условий для долгосрочного развития и модернизации промышленных предприятий.

3. Развитие научно-промышленного комплекса требует системного подхода к привлечению инвестиций, который должен учитывать как макроэкономические условия, так и институциональные особенности взаимодействия науки и промышленности. Эффективная реализация программ развития научно-промышленных комплексов требует использования комбинированных форм финансирования, включая государственно-частное партнерство, венчурные инвестиции, целевые субсидии и иные механизмы, способствующие долгосрочной капитализации проектов. Особое значение приобретает институциональная поддержка со стороны государства, выражающаяся в стимулировании

инвесторов, создании специализированной инфраструктуры и обеспечении координации участников инновационного процесса. Подчеркивается, что сочетание бюджетных и внебюджетных источников обеспечивает устойчивость инвестиционного процесса. Детализированы институциональные, экономические и инфраструктурные условия, способствующие формированию инвестиционного потока, отмечается важность предсказуемой нормативной среды и наличии механизмов координации интересов участников. Предложения основываются также и на усилении национальной валюты как источника дополнительных инвестиций.

4. В перспективе необходимо выстроить многоуровневую систему мотивации для всех участников научно-промышленного взаимодействия, направленную на достижение синергетического эффекта от объединения научного знания и производственного ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Romer, P. M. Endogenous Technological Change / P. M. Romer // *The Journal of Political Economy*. 1990. Vol. 98. No 5. Part 2. P. 71–102. <https://doi.org/10.1086/261725>.
2. Aghion, P. A Model of Growth Through Creative Destruction / P. Aghion, P. Howitt // *Econometrica*. 1992. Vol. 60. No 2. P. 323–351. <https://doi.org/10.2307/2951599>.
3. Lucas, R. E. On the Mechanics of Economic Development / R. E. Lucas // *Journal of Monetary Economics*. 1988. Vol. 22. №1. P. 3–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7).
4. Шумилин, А. Г. Формирование и развитие научно-промышленного комплекса в инновационной системе Республики Беларусь / А. Г. Шумилин, И. В. Устинович // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. 2023. № 2 (73). С. 30–37. <https://doi.org/10.52897/2411-4588-2023-2-30-37>.
5. Forbes, K. The Shocks Matter: Improving Our Estimates of Exchange Rate Pass-Through / K. Forbes, I. Hjortsoe, T. Nenova // *Journal of International Economics*. 2018. Vol. 114. P. 255–275. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2018.07.005>.
6. Benhabib, J. Financial Markets, the Real Economy, and Self-Fulfilling Uncertainties / J. Benhabib, X. Liu, P. Wang // *The Journal of Finance*. 2019. Vol. 74, No 3. P. 1503–1557. <https://doi.org/10.1111/jofi.12764>.
7. Hsu, P.-H. Currency Volatility and Global Technological Innovation / P.-H. Hsu, M. P. Taylor, Z. Wang, Q. Xu // *Journal of International Economics*. 2022. Vol. 137. Art. 103607. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2022.103607>.
8. Устинович, И. В. Научно-промышленный комплекс как одна из форм взаимодействия организаций / И. В. Устинович // *Труды БГТУ. Сер. 5. Экономика и управление*. 2023. № 2 (274). С. 72–77. <https://doi.org/10.52065/2520-6877-2023-274-2-10>.
9. Боев, А. Г. Формирование научно-промышленных комплексов в условиях цифровой экономики / А. Г. Боев //

Мир экономики и управления. 2021. Т. 21, № 1. С. 119–135. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2021-21-1-119-135>.

10. Шумилин, А. Г. Методологические подходы к разработке институциональных преобразований для формирования и развития научно-промышленного комплекса (на примере Республики Беларусь) / А. Г. Шумилин, И. В. Устинович // *Экономика науки*. 2024. Т. 10, № 4. С. 63–74. <https://doi.org/10.22394/2410-132X.484>.

Поступила 05.06.2025

Подписана в печать 07.08.2025

Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Romer P. M. (1990) Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98 (5, Part 2), S71–S102. <https://doi.org/10.1086/261725>.
2. Aghion P., Howitt P. (1992) A Model of Growth Through Creative Destruction. *Econometrica*, 60 (2), 323–351. <https://doi.org/10.2307/2951599>.
3. Lucas R. E. (1988) On the Mechanics of Economic Development. *Journal of Monetary Economics*, 22 (1), 3–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7).
4. Shumilin A. G., Ustinovich I. V. (2023) Formation and Development of the Scientific and Industrial Complex in the Context of the Republic of Belarus Socio-Economic Development. *The Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development*, 2 (73), 30–37. <https://doi.org/10.52897/2411-4588-2023-2-30-37>.
5. Forbes K., Hjortsoe I., Nenova T. (2018) The Shocks Matter: Improving Our Estimates of Exchange Rate Pass-Through. *Journal of International Economics*, 114, 255–275. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2018.07.005>.
6. Benhabib J., Liu X., Wang P. (2019) Financial Markets, the Real Economy, and Self-Fulfilling Uncertainties. *The Journal of Finance*, 74 (3), 1503–1557. <https://doi.org/10.1111/jofi.12764>.
7. Hsu P.-H., Taylor, M. P., Wang, Z., & Xu, Q. (2022). Currency Volatility and Global Technological Innovation. *Journal of International Economics*, 137, 103607. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2022.103607>.
8. Ustinovich I. V. (2023) Scientific and Industrial Complex as One of the Organizations Interaction Forms. *Proceedings of BSTU, issue 5, Economics and Management*, (2), 72–77. <https://doi.org/10.52065/2520-6877-2023-274-2-10> (in Russian).
9. Boev A. G. (2021) Formation of Scientific and Industrial Complexes in the Digital Economy. *World of Economics and Management*, 21 (1), 119–135. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2021-21-1-119-135> (in Russian).
10. Shumilin A. G., Ustinovich I. V. (2024) Methodological Approaches to the Institutional Transformations for the Formation and Development of the Scientific and Industrial Complex (on the Example of the Republic of Belarus). *Economics of Science*, 10 (4), 63–74. <https://doi.org/10.22394/2410-132x.484> (in Russian).

Received: 05.06.2025

Accepted: 07.08.2025

Published online: 30.09.2025