

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-12-19

С. В. Хаустов, В. В. Пай*, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Д. Кочкалов, В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко

**ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ УДАРНО-СЖАТОЙ СРЕДЫ
В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ**

Волгоградский государственный технический университет

** Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск*

Автор, ответственный за переписку: Святослав Викторович Хаустов (regent_k@mail.ru)

Аннотация: В настоящей работе разработан терморезистивный метод определения тепловых потоков для измерения величины теплового потока в ударно-сжатых средах. Суть метода заключается в изменении электрического сопротивления медного проводника при его нагреве высокоскоростным нагретым потоком газа. Предложена конструкция малоинерционного терморезистивного датчика с толщиной чувствительного медного слоя в 15 мкм и временным разрешением до 2,5 – 3 мкс. Впервые получены значения теплового потока по длине области ударно-сжатого газа при сварке взрывом стальных пластин. Показано, что на мощность теплового потока влияет характер протекания кумулятивных процессов перед точкой контакта, которые в свою очередь зависят от материала свариваемых пластин.

Ключевые слова: Сварка взрывом, ударно-сжатый газ, тепловой поток, терморезистивный метод, кумуляция

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20284, <https://rscf.ru/project/25-29-20284/>

Для цитирования: Хаустов С. В., Пай В. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Кочкалов А. Д., Агеев В. В., Емельяненко М. Ю. Терморезистивный метод измерения тепловых потоков от ударно-сжатой среды в зазоре между пластинами при сварке взрывом. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):12–19. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-12-19>

S. V. Khaustov, V. V. Pai, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, A. D. Kochkalov, V. V. Ageev, M. Yu. Emelyanenko

**THERMORESISTIVE METHOD FOR MEASURING HEAT FLUXES FROM A SHOCK-COMPRESSED
MEDIUM IN THE GAP BETWEEN PLATES DURING EXPLOSION WELDING**

Volgograd State Technical University

** Lavrentyev Institute of hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk*

The author responsible for the correspondence: Svyatoslav Viktorovich Khaustov (regent_k@mail.ru)

Annotation: In this paper, a thermoresistive method for measuring heat flux in shock-compressed media is developed. The method relies on changing the electrical resistance of a copper conductor when heated by a high-velocity, heated gas flow. A low-inertia, thermoresistive sensor with a sensitive copper layer thickness of 15 μm and a time resolution of up to 2.5-3 μs is proposed. For the first time, heat flux values were obtained along the length of the shock-compressed gas region during explosion welding of steel plates. It is shown that the heat flux is influenced by the nature of cumulative processes before the contact point, which in turn depend on the material of the plates being welded.

Keywords: Explosion welding, shock-compressed gas, heat flux, thermoresistive method, cumulation

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 25-29-20284, <https://rscf.ru/project/25-29-20284/>

To cite: Khaustov S. V., Pai V. V., Kuzmin S. V., Lysak V. I., Kochkalov A. D., Ageev V. V., Emelyanenko M. Yu. Thermoresistive method for measuring heat fluxes from a shock-compressed medium in the gap between plates during explosion welding. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):12–19. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-12-19>

При сварке взрывом металлических пластин по наиболее распространенной плоско-параллельной схеме в воздушном зазоре между пластинами при их соударении возникает область ударно-сжатого газа (УСГ), нагретого до нескольких тысяч градусов [1,

2]. Двигаясь перед точкой контакта область УСГ за счет конвективного теплообмена нагревает поверхности пластин еще до их соударения [3]. В работе [4] предложен экспериментальный термопарный метод, основанный на эффекте Зеебека, для определения теплового потока от ударно-сжатого воздуха и позволяющий определять температуры подогрева поверхностей пластин перед соударением. Заполнение зазора инертными газами, такими как аргон и гелий [5] показало, что мощность теплового потока от УСГ существенно зависит от кумулятивных процессов перед точкой контакта (количеством металлических частиц и их распределением по длине области УСГ) и плотности газа, заполняющего зазор. Однако используемый в работах [4, 5] термопарный метод исключительно чувствителен к электрическим помехам, возникающим при высокоскоростном соударении металлов. Это ограничивает использование термопарного метода при сварке взрывом немагнитными материалами.

В данной работе разработан терморезистивный метод, основанный на изменении электрического сопротивления медного проводника при его конвективном нагреве ударно-сжатой средой.

В качестве терморезистивного датчика использовалось покрытие из медной фольги 1 размещенной на подложке 2 (см. рис. 1). Медное покрытие подвергалось травлению таким образом, чтобы образовалась плоская бифилярная катушка, уменьшающая паразитную индуктивность и магнитные помехи за счёт взаимной компенсации магнитных полей встречно-направленных токов в соседних проводниках. Зависимость электрического сопротивления такого датчика от температуры описывается формулой:

$$R(T) = \frac{\rho L}{S} [1 + \alpha(T - 20)], \quad (1)$$

где $\alpha = 0,0043 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – температурный коэффициент электрического сопротивления меди, $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди при 20°C .

Сопротивление терморезистивного датчика при толщине медного слоя $\sim 15 \text{ мкм}$ и

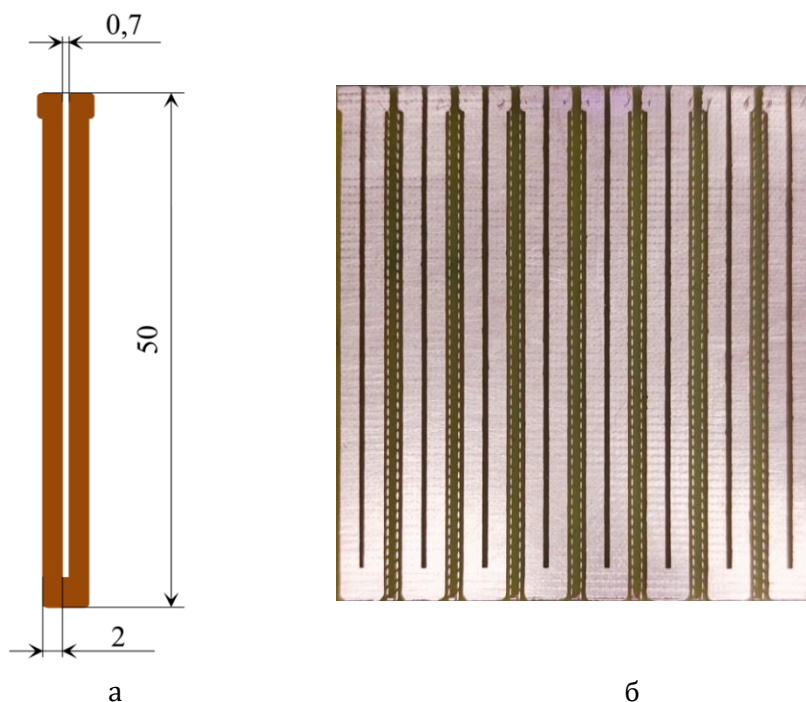


Рис. 1. Геометрические размеры (а) и внешний вид (б) планарных терморезистивных датчиков

геометрических размерах указанных на рис. 1 составляло $0,055 \pm 0,001$ Ом.

Схема эксперимента показана на рис. 2. Сваривались стальные пластины толщиной 3,5 мм и размерами 465 на 150 мм установленные по плоско-параллельной схеме с зазором 8 мм. Терморезистивный датчик размещался на изоляторе из дерева в колодце в неподвижной стальной пластине (рис. 2, б)

на расстоянии 360 мм от начала пластины. Для обеспечения одинаковых условий теплообмена с ударно-сжатым газом, плоскость датчика была параллельна плоскости пластин. Верхняя пластина металась зарядом взрывчатого вещества (смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком в соотношении 67/33 % об.) высотой $H=25$ мм. Скорость детонации контролировалась электроконтактным спо-

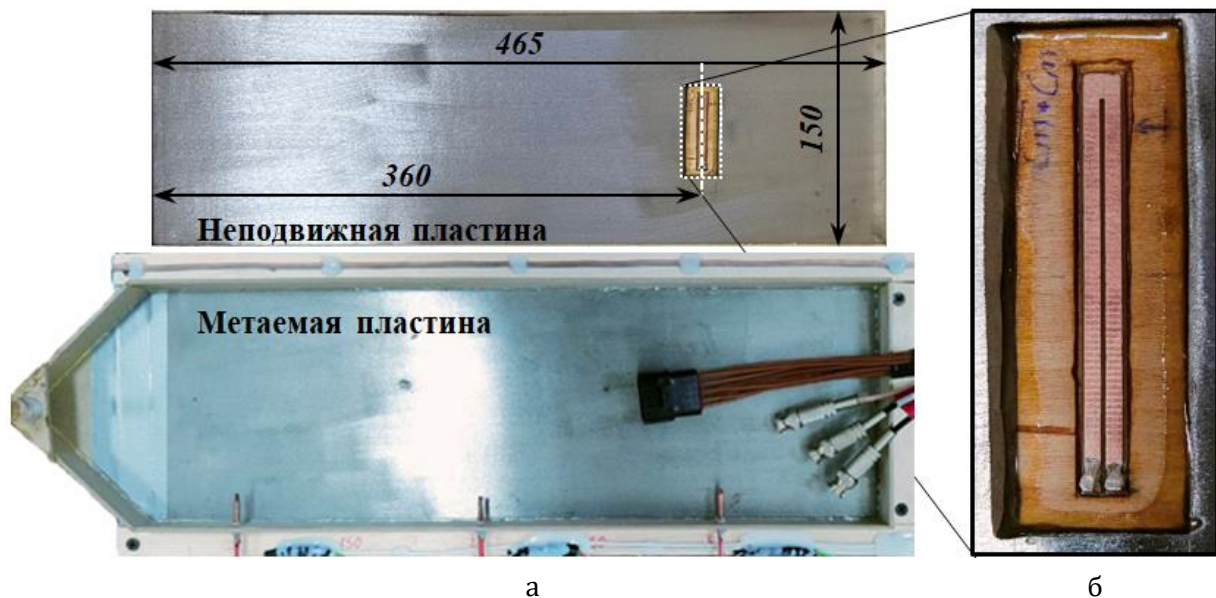


Рис. 2. Схема измерения теплового потока при сварке взрывом стальных пластин (а) толщиной 3,5+3,5 мм в среде воздуха и колодец в неподвижной пластине с размещенным на изоляторе терморезистивным датчиком (б)

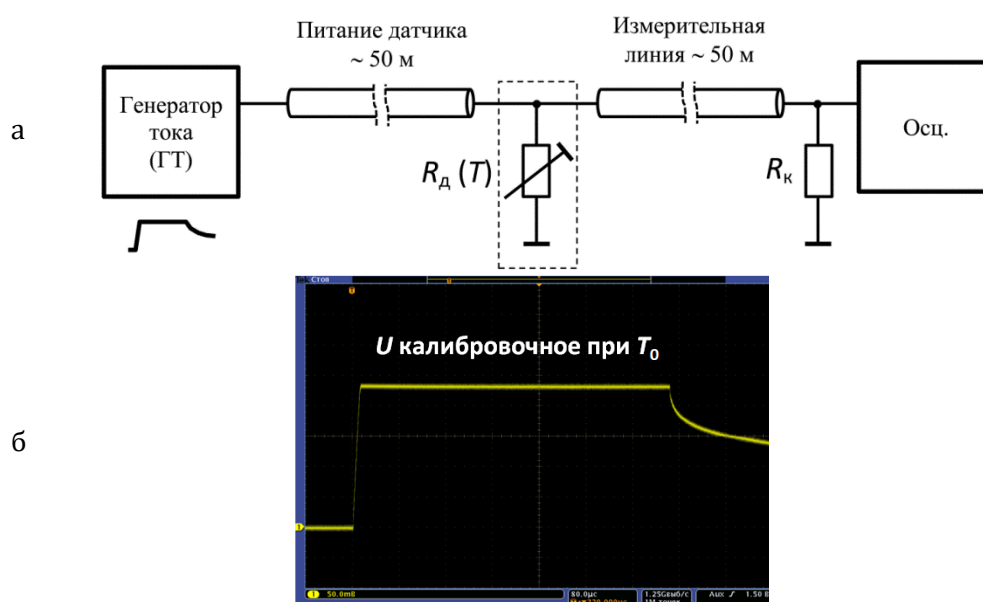


Рис. 3. Схема подключения терморезистивного датчика к питающей и измерительной аппаратуре (а) и калибровочное напряжение на датчике (б)

собою и составила 2660 ± 50 м/с.

После начала сварки взрывом (момент инициирования заряда ВВ) через датчик пропусклся импульс постоянного тока ($I_{ГТ} = 2,73 \pm 0,001$ А) длительностью 0,4...1,3 мс. Под воздействием области ударно-сжатого газа чувствительный медный слой толщиной 15 мкм прогревается за ~2,5...3 мкс и изменяет свое электрическое сопротивление, что фиксируется цифровым осциллографом (Tektronix MSO 4054). Датчик под-

ключался к питающей и измерительной аппаратуре по четырёхточечной схеме, так как показано на рис. 3, а. Калибровочное напряжение $U_{\text{кал}}$ при прохождении импульса постоянного тока через терморезистивный датчик при температуре равной температуре окружающей среды T_0 составляло ~152 мВ (см. рис. 3, б).

На рис. 4 показана осциллограмма процесса нагрева терморезистивного датчика. В какой-то момент времени фронт ударной

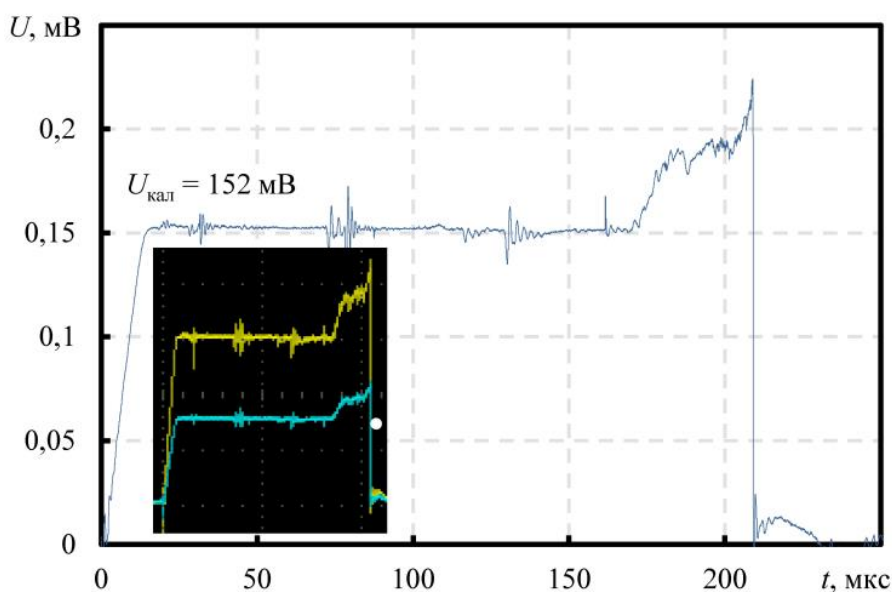


Рис. 4. Типичная осциллограмма напряжения на терморезистивном датчике при сварке взрывом стальных пластин в среде воздуха ($V_k = 2660$ м/с)

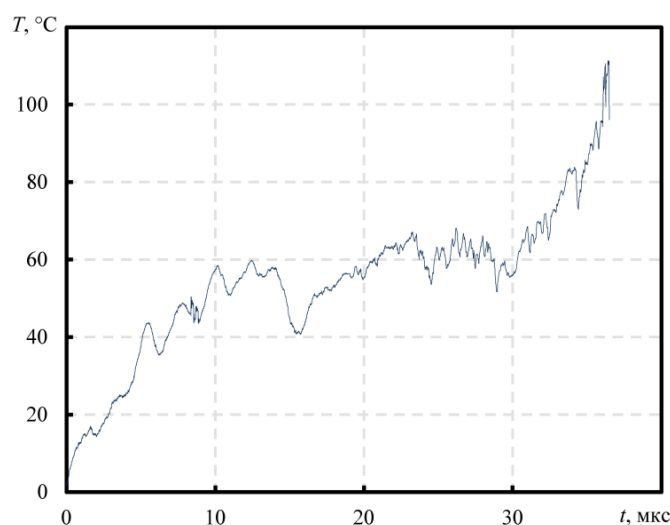


Рис. 5. Экспериментальная зависимость средней температуры медного слоя терморезистивного датчика

волны достигает датчика и нагревает его конвективным тепловым потоком. Это приводит к монотонному росту напряжения, обусловленного увеличением сопротивления датчика, вплоть до момента налета метаемой пластины на датчик, его разрушения и резкого обрыва сигнала. Время воздействия t_l области УСГ на датчик, расположенный на расстоянии $L=0,36$ м от начала сварки, составило ~ 36 мкс. При скорости точки контакта V_k равной скорости детонации D скорость фронта ударной волны в воздухе составила [5]:

$$V_{yB} = \frac{L}{L/V_k - t_l} = 3620 \text{ м/с},$$

а размеры высокотемпературной области, в момент достижения датчика фронтом ударной волны в газе, достигли:

$$L(1 - V_k/V_{yB}) = 95 \text{ мм}.$$

Таким образом, скорость фронта ударной волны в воздухе составила $\sim 1,36V_k$, что хорошо соотносится с данными работ [4, 5] где

терморезистивного датчика от времени по формуле:

$$\Delta T(t) = \frac{\left(\frac{U(t)_{\text{экс}}}{U_{\text{калиб}}} - 1\right)}{0,0043}. \quad (2)$$

Рассчитанное таким образом изменение температуры ΔT датчика показано на рис. 5. Начальный прогрев медного слоя при воздействии фронта ударной волны осуществлялся за время 2,5-3 мкс (при общем времени теплового воздействия около 36 мкс) и в дальнейшем разница температур между внешней и внутренней поверхностью медного слоя не превышала 5%, а сам датчик непрерывно измерял осреднённую по толщине медного слоя температуру датчика.

Используя экспериментальную зависимость изменения средней температуры медного слоя датчика решением обратной задачи (по методике, описанной в [6]) была определена мощность теплового потока от УСГ (см. рис. 6). Видно, что по сравнению с тепловым потоком при сварке взрывом медных пластин в воздушной среде, опреде-

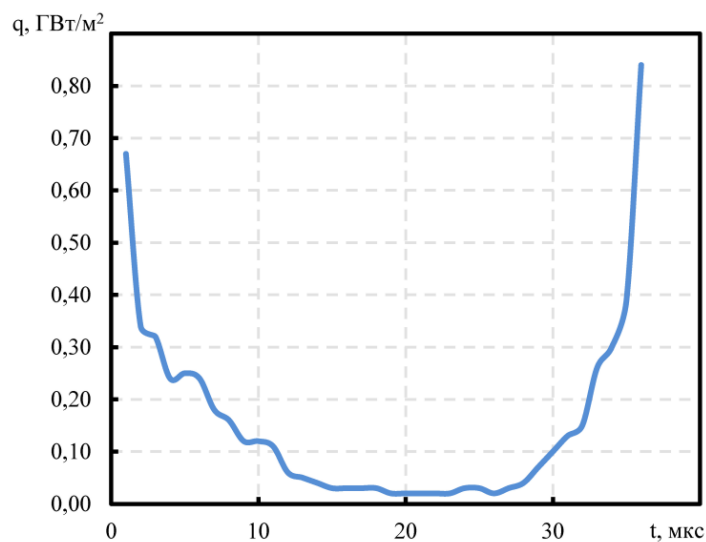


Рис. 6. Изменение мощности теплового потока от ударно-сжатого воздуха при сварке взрывом стальных пластин

были получены схожие значения при сварке взрывом медных пластин в среде воздуха, гелия и аргона.

Используя экспериментальную осциллограмму (рис. 4), можно определить приращение средней температуры медного слоя

ленным в работе [5] ($\sim 0,4$ ГВт/м²), тепловой поток при сварке стальных пластин резко отличается по длине области УСГ и характеризуется максимальными значениями на фронте ударной волны ($\sim 0,65$ ГВт/м²) и вблизи точки контакта ($\sim 0,85$ ГВт/м²). В ос-

новной (центральной) области УСГ значения теплового потока составляет $\sim 0,05$ ГВт/м². Разница в мощности теплового потока по длине области УСГ при сварке меди и стали может быть обусловлена разным характером протекания кумулятивных процессов при соударении и совместной пластической деформации стальных и медных пластин, а также разной плотностью «впрыскиваемых» в зазор стальных и медных частиц.

Выводы

1. Разработан терморезистивный метод определения теплового потока от ударно-сжатого воздуха в зазоре между пластинами при их сварке взрывом, менее чувствительный к электрическим помехам в сравнении с термопарным методом, а также предложена конструкция малоинерционного терморезистивного датчика.

2. Впервые получены значения теплового потока от УСГ при сварке взрывом стальных пластин. Установлено, что, в отличие от сварки взрывом медных пластин, мощность теплового потока существенно меняется по длине области ударно-сжатого газа и максимальна вблизи точки контакта и на фронте ударной волны.

3. Показано, что на мощность теплового потока влияет характер протекания кумуля-

тивных процессов перед точкой контакта, которые в свою очередь зависят от материала свариваемых пластин.

Библиографический список

1. Ishutkin, S. N. Thermal action of shock-compressed gas on the surface of colliding plates / S. N. Ishutkin, V. I. Kirko, and V. A. Simonov // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 1980. – Vol. 16. – Pp. 663-667. <https://doi.org/10.1007/BF00741515>
2. Kudinov, V. M. Explosion welding in metallurgy [in Russian] / V. M. Kudinov, A. Ya. Koroteev. – Moscow: Metallurgy. – 1978. – 166 p.
3. Zakharenko, I. D. Explosive Welding of Metals [in Russian] / I. D. Zakharenko. – Minsk: Nauka Tekhnika. – 1990. – 204 p.
4. Investigation of thermal processes in the gap during explosion welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 209. – P. 124166. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124166>
5. The influence of the shock-compressed gas composition in the gap between metal plates on the processes occurring before contact point during explosion welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, A. D. Kochkalov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2025. – Vol. 244. – P. 126920. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126920>
6. Thermal effect of explosive detonation products on a flyer plate in the explosive welding of metals / S. V. Khaustov, V. V. Pai, Y. L. Lukyanov, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 163. – P. 120469. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120469>

Информация об авторах

Святослав Викторович Хаустов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
<https://orcid.org/0000-0002-7245-7195>
e-mail: regent_k@mail.ru

Владимир Васильевич Пай – доктор физико-математических наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией динамических воздействий Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
e-mail: pai@hydro.nsc.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>
e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Алексей Дмитриевич Кочкалов – аспирант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0009-0009-9725-4974>

e-mail: ko4kalov2011@gmail.com

Виктор Витальевич Агеев – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Максим Юрьевич Емельяненко – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Information about the authors

Svyatoslav V. Khaustov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Equipment and Technology of Welding Production, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-7245-7195>

e-mail: regent_k@mail.ru

Vladimir V. Pai - Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Acting Head of the Laboratory of Dynamic Effects of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

e-mail: pai@hydro.nsc.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Alexey D. Kochkalov is a postgraduate student at Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0009-0009-9725-4974>

e-mail: ko4kalov2011@gmail.com

Viktor V. Ageev is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Maxim Y. Emelianenko is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Вклад авторов

С. В. Хаустов – определение цели работы, анализ экспериментов, написание текста статьи

В. В. Пай – разработка методологии

С. В. Кузьмин – научное руководство, анализ и интерпретация полученных данных

В. И. Лысак – научное руководство

А. Д. Кочкалов – подготовка и проведение эксперимента

В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко – подготовка материалов для проведения исследований

Contribution of the authors

S. V. Khaustov – defining the purpose of the work, analyzing experiments, writing the text of the article

V. V. Pai – methodology development

S. V. Kuzmin – scientific guidance, analysis and interpretation of the data obtained

V. I. Lysak – scientific guidance

A. D. Kochkalov – preparation and conduct of the experiment

V. V. Ageev, M. Y. Emelianenko – preparation of materials for research

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 13.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 13.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*