

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-5-11

Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай*

**О РАСЧЁТЕ МАКСИМАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ
В РЕЖИМЕ СИЛЬНОГО НЕДОРАЗГОНА УДАРНИКА**

ООО «Протол», Екатеринбург

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

Автор, ответственный за переписку: Юрий Петрович Бесшапошников (bm@protol.ru)

Аннотация: Предложен метод расчёта максимального импульса продуктов детонации в условиях сильного ускорения ударника при сварке взрывом.

Ключевые слова: Угол поворота, импульс, давление, продукты детонации, сварка взрывом, зазор, ударник

Для цитирования: Бесшапошников Ю. П., Пай В. В. О расчёте максимального импульса продуктов детонации при сварке взрывом в режиме сильного недоразгона ударника. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):5–11.

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-5-11>

Yu. P. Besshaposhnikov, V. V. Pai*

**ON THE DETONATION PRODUCT MAXIMUM IMPULSE CALCULATION AT EXPLOSION WELDING
IN THE IMPACTOR STRONG ACCELERATION MODE**

Protol Ltd, Yekaterinburg

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

The author responsible for the correspondence: Yuri Petrovich Beshaposhnikov (bm@protol.ru)

Annotation: A method for calculating the maximum impulse of detonation products under impactor strong acceleration during explosion welding is proposed.

Keywords: Bending angle, impulse, pressure, detonation products, explosion welding, stand-off, impactor

To cite: Besshaposhnikov Yu. P., Pai V. V. On the detonation product maximum impulse calculation at explosion welding in the impactor strong acceleration mode. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):5–11.

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-5-11>

Введение

В [1], на основе двумерной модели [2], представлена модернизированная методика определения предельного угла поворота пакета – композиции из соударившихся частей пластин при их косом соударении. Однако, как в [1], так и [2] предполагалось, что первая (ударник) и вторая пластины достаточно удалены друг от друга. В настоящей работе предложен критерий выбора минимального (критического) значения зазора между ударником и второй пластиной, при котором расчётная методика еще остается справедливой. Также разработан способ рас-

чёта максимального импульса ПД при зазоре между этими пластинами меньше критического значения.

Методы расчёта

Выпишем из [1] некоторые обозначения, которыми будем пользоваться в настоящей работе: (x, y) – система декартовых координат, связанная с фронтом детонации, где ось x направлена вдоль первоначального положения ударника в противоположную от движения фронта сторону, ось y – в сторону смещения пластины; y_0 – расстояние от ударника до мишени (последняя пластина); x_0 – абсцисса начала движения пакета; H –

толщина слоя взрывчатого вещества (ВВ); r – отношение массы ВВ к массе пакета или пластины (коэффициент нагрузки); k – интегральный показатель политропы заряда ВВ. Введём дополнительные обозначения: i_y – проекция на ось y максимального импульса продуктов детонации; i_{yr_0} – значение i_y , соответствующее полному разгону ударника; i_{yr} – значение i_y , соответствующее полному разгону пластины массой, равной массе пакета; h – первоначальное расстояние (зазор) между соседними пластинами; $\beta_{\text{пред}}$ – предельный угол поворота пакета; p_D – давление детонации.

Пусть $x_0 \rightarrow 0$ ($h \rightarrow 0$), тогда $i_y \rightarrow i_{yr}$. Представленный в [1, 2] метод определения $\beta_{\text{пред}}$ (или i_y) здесь приводит к физическому противоречию: $i_y \rightarrow i_{yr_0}$. Отсюда следует, что существует некоторое критическое значение $x_{\text{кр}}$ (или $h_{\text{кр}}$), меньше которого этот (основной) метод формально теряет силу, а поэтому требуется разработать другой (дополнительный) метод расчёта, действительный при $x_0 \leq x_{\text{кр}}$.

Рассмотрим условие применимости основного метода расчёта:

$$x^* \geq x_0 \geq x_{\text{кр}},$$

где x^* – значение x , при котором импульс ПД, с практической точки зрения, достигает максимального значения, то есть считается, что пластины после соударения разошлись до предельной скорости.

Тогда можно пользоваться приближением:

$$p(x^*) \approx p_{r_0}(x^*),$$

где p – давление в ПД у поверхности пакета; p_{r_0} – давление в ПД у поверхности свободно метаемого ударника.

В [2] абсциссу x^* находили из выражения:

$$\frac{p_{r_0}(x^*)}{p_D} = \varepsilon,$$

где ε – наперёд заданная сколь угодно малая величина.

В [1] предложено использовать равенство:

$$\frac{p_r(x^*) - p_{r_0}(x^*)}{p_D} = \varepsilon,$$

где p_r – давление в ПД у поверхности свободно метаемой пластины, массой равной массе пакета с коэффициентом нагрузки r .

Последняя формула, в отличие от предыдущего выражения, обеспечивает более корректный выбор ε , что позволяет, на пример, строить графические зависимости $\beta_{\text{пред}}$ от h с плавным изменением предельного угла.

В настоящей работе x^* определяли из уравнения:

$$p_0(x^*) - p_{r_0}(x^*) = \Delta p_{\text{min}},$$

где p_0 – пиковое давление остаточных продуктов детонации (часть ПД, которая продолжает воздействовать на пластины с момента их соударения), равное давлению на фронте отраженной ударной волны в ПД при соударении ударника и мишени, у которой масса равна массе пакета; Δp_{min} – приращение давления на фронте отраженной ударной волны в ПД при $x_0 = x^*$.

Главным достоинством этого уравнения является его способность к унификации метода поиска x^* . Это достигается за счет задания одного достаточно малого значения $(\Delta p_{\text{min}} / p_D)$, единого для всех режимов соударения. Так, в настоящей работе использовалось значение $(\Delta p_{\text{min}} / p_D) = 10^{-6}$, при котором $\varepsilon \sim (10^{-13} - 10^{-17})$. Проверка показала, что дальнейшее уменьшение $(\Delta p_{\text{min}} / p_D)$ уже не оказывало существенного влияния на расчётные значения $\beta_{\text{пред}}$.

Применив основной метод определения предельного угла поворота пакета из двух пластин, с учётом приведенных выше поправок, было установлено, что с уменьшением h величина $\beta_{\text{пред}}$ растёт до определенного максимума, после которого снижается, но с

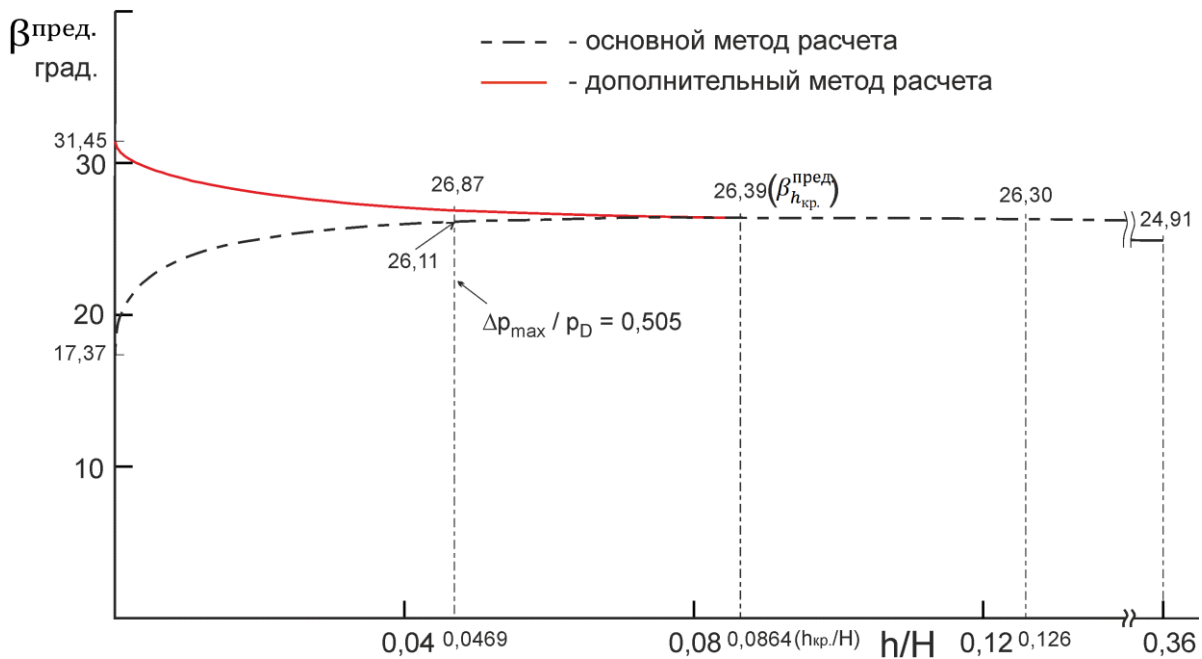


Рис. 1. Графические зависимости предельного угла от зазора между ударником и мишенью с одинаковыми коэффициентами нагрузки, равными 12

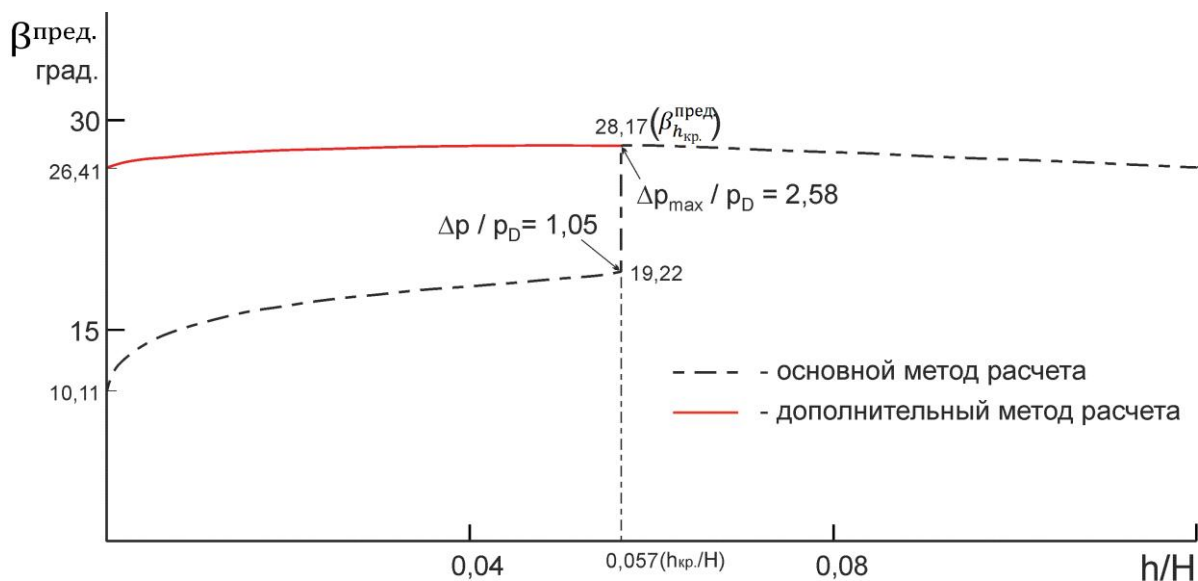


Рис. 2. Графические зависимости предельного угла от зазора между ударником и мишенью, у которых коэффициент нагрузки равен 12 и 5 соответственно

темпом, превосходящим предыдущий темп роста. В качестве примера, на рис. 1 показана зависимость $\beta_{\text{пред.}}$ от h/H при $k = 2,5$ для случая соударения двух пластин, равных по массе. Откуда видно, что в диапазоне h/H от 0,0864, где $\beta_{\text{пред.}}$ достиг своего максимума, до 0,0469, где зафиксировано максимальное приращение давления (Δp) на фронте отра-

женной ударной волны в ПД, образованной в результате соударения ударника и мишени, предельный угол уменьшился на $0,28^\circ$. А на таком же расстоянии с противоположной стороны от максимума в диапазоне h/H от 0,126 до 0,0864 этот угол изменился (увеличился) всего на $0,09^\circ$. На рис. 2 представлен предельный случай обнаруженной законо-

мерности. Здесь показана аналогичная зависимость при $k = 2,5$, где по достижении $\beta_{\text{пред.}}$ и Δr своих максимумов эти величины терпят разрыв. Перепад у Δr объясняется процессом перехода от прямой к косой отраженным ударным волнам в ПД [3]. Наличие же перепада у $\beta_{\text{пред.}}$, по-видимому, не имеет физического обоснования. Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что максимум функции $i_y(x_0)$ является критерием выбора критического значения зазора между ударником и второй пластиной. На рис. 1 и 2 – это точка с координатами $(\beta_{h_{\text{кр.}}}^{\text{пред.}}, h_{\text{кр.}})$.

Теперь рассмотрим условие, в рамках которого требуется разработать дополнитель-

$$\Delta\alpha = \alpha_0 \frac{X_0}{X_{\text{кр.}}}$$

Подстановка этого выражения в предыдущее уравнение дает окончательный вид зависимости для α в указанном выше интервале:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{X_0}{X_{\text{кр.}}}\right). \quad (2)$$

После интегрирования (1), с учетом (2) и соответствующих преобразований, получим:

$$I_y = I_{\text{кр.}} + \frac{X_{\text{кр.}}}{\alpha_0} \ln \cos \alpha. \quad (3)$$

Угол α_0 определяется через подстановку в (3) известного $I_{\text{уг.}}$.

На рис. 1 и 2 представлены графики, построенные с применением вышеизложенно-

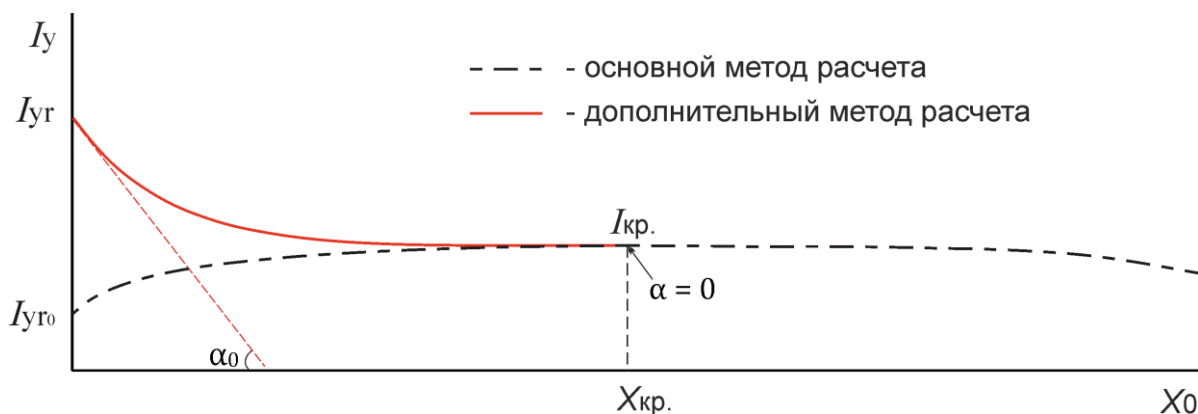


Рис. 3. Иллюстрация зависимостей I_y от X_0 для двухслойного метания пластин:

$I_y = \frac{i_y}{m_{\text{вв}} D}$, где $m_{\text{вв}}$, D – масса и скорость детонации ВВ, соответственно; $X_0 = x_0/H$;
 α – угол наклона к оси абсцисс касательной к функции $I_y(X_0)$ в текущей точке;
 α_0 – начальное значение α .

ный способ расчёта i_y :

$$x_{\text{кр.}} \geq x_0 \geq 0.$$

Согласно рис. 3:

$$\frac{dI_y}{dX_0} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Пусть:

$$\alpha = \alpha_0 - \Delta\alpha,$$

где $\Delta\alpha$ – некоторое приращение угла α .

Из соображения простоты считаем, что $\Delta\alpha$ изменяется по линейному закону:

го дополнительного метода расчёта. Угол $\beta_{\text{пред.}}$ находили согласно закону сохранения импульса, используя выражение:

$$(1) \quad I_y = \frac{\sin \beta^{\text{пред.}}}{r}$$

Отметим, что в случае многослойного метания дополнительный метод распространяется только на метание слоя, состоящего из первых двух пластин. Метание последующих слоёв рассчитывается с использованием основного метода.

Результаты расчетов и экспериментов

№ опыта	ВВ (плотность x10 ³ , кг/м ³)	H x 10 ³ , м	D, м/с	Материал пластины, начиная сверху от заряда	Толщина пластины x10 ³ , мм	τ	κ	h _{кр.} x 10 ³ , м (β _{пред.} h _{кр.} , град.)	h	(y - y ₀)	β _y , град.							
											Расчет		Эксперимент					
											осн.	доп.*						
1	Аммонит АТ-1 (1,0)	70	2970	Алюминий АД0	2	12,9	2,6	5,28 (25,16)	1,5	∞	24,27	26,63	-					
					2	12,9				24,2	23,13	24,92	24,8					
2			2975		10	2,59		8,76 (12,95)		∞	12,54	13,45	-					
					10	2,59		21,0		11,65	11,53	11,6						
3			2850		2	12,9		1,82 (14,50)		∞	14,48	14,55	-					
					10	2,59		30,5		14,35	14,41	15,0						
4	Смесь 6ЖВ /АСК =1/6 (0,87)	50	2270	Медь М1	4	1,22	6,45 (12,77)	4,0	∞	12,74	12,80	-						
				Титан ВТ1-0	4	2,42			10,9	10,37	10,39	10,4						
5	Смесь 6ЖВ /АСК =1/5 (0,87)	40	2330	Медь М1	4	0,98	4,86 (10,93)	4,5	∞	10,93	10,93	-						
				Титан ВТ1-0	4	1,93			13,1	9,58	9,58	9,8						
6	Смесь 6ЖВ /АСК =1/4 (0,87)	30	2210	Медь М1	4	0,73	3,28 (8,79)	4,0	∞	8,79	-	-						
				Титан ВТ1-0	4	1,45			12,5	8,03	-	8,1						
7	Аммонит 6ЖВ (0,90)	20	3970	Ал. сплав АМг2	1,9	3,53	2,45	2,75 (18,93)	1,5	∞	18,80	19,11	-					
				Алюминий А6	1,5	4,44								-	1,0	∞	13,42	13,50
				Ал. сплав АМг2	1,9	3,53		-	1,0	12,3	12,97	13,04	13,4					
														3,34				
8	АСМ (0,85)	20	1510	Алюминий А6	1,5	4,20	2,0	3,89 (26,16)	1,5	∞	25,53	26,18	-					
				Ал. сплав АМг2	1,9	3,34								-	1,0	∞	18,88	19,03
				Ал. сплав АМг2	1,9	3,34		-	1,0	10,0	17,44	17,58	17,0					
														6,87				
9	Смесь АСМ/ДМ =3/1 (0,70)	50	3125	Алюминий А6	1,5	8,64	2,15	6,89 (31,51)	1,5	∞	29,54	31,99	-					
														Ал. сплав АМг2	1,9	6,87	-	1,0
				Ал. сплав АМг2	1,9	6,87		6,89 (31,51)	1,5	∞	29,54	31,99	-					
														Алюминий А6	1,5	8,64	-	1,0
10			3070	Ал. сплав АМг2	1,9	6,87		-	1,9	∞	18,26	18,66	-					
				Алюминий А6	1,5	8,64		-	1,0	∞	15,07	15,41	-					
				Ал. сплав АМг2	1,9	6,87		-	26,3	14,73	15,05	15,8						
				11	Смесь АСМ+ 5%ИМ.(0,72)	50		3200	Ал. сплав АМг2		7,07	2,35	5,90 (26,94)	1,5	∞	25,80	27,77	-
									Алюминий А6	1,5	8,89							
									Ал. сплав АМг2	1,9	7,07		-	24,7	18,16	18,53	19,0	

Примечания: АСК(М) – аммиачная селитра кристаллическая (мелкого помола), Гл. – глицерин технический, ИМ – индустриальное масло; ДМ – древесная мука (содержание сыпучих компонентов для смесевых взрывчатых веществ дано в объемном соотношении, содержание жидких компонентов – от объема аммиачной селитры); β_u – угол поворота пакета на расстоянии u от ударника. * – в опытах с многослойным метанием расчеты по дополнительному методу проводились только для метания слоя из первых двух пластин.

Экспериментальная проверка

В таблице приведены результаты расчетов и экспериментов, полученные с использованием опытных данных [4]. Из этой таблицы видно, что во всех опытах, кроме оп. №6, $h < h_{кр}$. При этом $h_{кр}$ существенно уменьшается, если масса второй пластины значительно больше массы ударника (оп. №3).

Из той же таблицы следует, что значения $\beta_{пред}$, полученные с использованием как основного, так и дополнительного методов расчета, хорошо совпадают с соответствующими значениями этого угла, полученными из экспериментов. Расхождения расчета, по основному и дополнительному методам, и эксперимента колебались в диапазоне от 0,29% (оп. № 4) до 6,77% (оп. № 10), что в среднем составило 3,12%, и от 0,1% (оп. № 4) до 4,75% (оп. № 10), что в среднем составило 2,52%, соответственно. Это показывает, что даже незначительные в масштабе сварки взрывом зазоры между ударником и второй пластиной оказались недостаточно малыми, чтобы результаты по основному и дополнительному расчетным методам существенно различались между собой.

Выводы

1. Оптимизирован основной метод расчета максимального импульса продуктов детонации для косого соударения нескольких пластин в условиях сварки взрывом.

2. Разработан дополнительный метод расчета максимального импульса продуктов детонации для косого соударения двух пластин, когда зазор между ними меньше критического значения.

3. Критическое значение зазора определяется по основному методу расчета и соответствует экстремуму функции максимального импульса продуктов детонации от размера зазора.

4. В промышленных условиях сварку взрывом проводят на режимах, при которых зазор между пластинами, если и меньше критического значения, то не настолько, чтобы результаты, полученные с помощью основного и дополнительного методов расчета, существенно различались.

Библиографический список

1. Бесшапошников, Ю. П. Единственность решения задачи о многослойном метании пластин скользящей детонационной волной / Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2024. – № 11(294). – С. 5-11.
2. О многослойном метании пластин скользящей детонационной волной / Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай, А. А. Петунин, В. И. Чернухин // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2018. – № 11 (221). – С. 22-27.
3. Физика взрыва / Орленко Л. П. – Изд. 3-е, испр. — В 2 т. Т. 1. – М. : Физматлит, 2004. – 832 с.
4. Бесшапошников, Ю. П. Прямая ударная волна в продуктах детонации при сварке взрывом / Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай, В. И. Чернухин // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2019. – № 11 (234). – С. 11-18.

Информация об авторах

Юрий Петрович Бесшапошников – кандидат технических наук, научный консультант ООО «Протол»

<https://orcid.org/0000-0002-9455-5765>

e-mail: ybesshaposhnikov@yandex.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

Information about the authors

Yuri P. Besshaposhnikov, Candidate of Technical Sciences, Scientific advisor of Protol Ltd.

<https://orcid.org/0000-0002-9455-5765>

e-mail: ybesshaposhnikov@yandex.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

Вклад авторов

Ю. П. Бессапошников - разработка методик, проведение расчетов, анализ полученных результатов, написание текста статьи

В. В. Пай - постановка задачи, обсуждение результатов

Contribution of the authors

Y. P. Besshaposhnikov – development of methods, calculation, analysis of the obtained results, wrote the article

V. V. Pai – task setting, discussion of results

*Статья поступила в редакцию 11.09.2025, доработана 31.10.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 11.09.2025, revised 31.10.2025,
accepted for publication 21.11.2025*