

Вятский государственный университет

Advanced science

Н а у ч н ы й ж у р н а л

№ 4 (15)

Киров
2019

ББК 74.48я52

A22

Главный редактор

Е. М. Вечтомов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, ВятГУ,
ORCID: 0000-0002-3490-2956

Заместитель главного редактора

Д. Е. Прозоров, доктор технических наук, доцент, профессор, ВятГУ, ORCID: 0000-0002-3577-8838

Ответственный секретарь

Е. Н. Лубягина, кандидат физико-математических наук, доцент, ВятГУ, ORCID: 0000-0001-5071-6208

Состав редакционной коллегии:

А. В. Алешкин, доктор технических наук, профессор, директор, ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока» (г. Киров)

В. И. Варанкина, кандидат физико-математических наук, доцент, ВятГУ (г. Киров), ORCID: 0000-0003-4166-1182

И. В. Губин, кандидат технических наук, доцент, директор, Политехнический институт, ВятГУ (г. Киров)

В. И. Джиган, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Московский исследовательский центр ООО «Техкомпания Хуавэй» (г. Москва)

С. И. Калинин, доктор педагогических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, ВятГУ (г. Киров)

И. Б. Кожухов, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (г. Москва)

Е. В. Котельников, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, ВятГУ (г. Киров)

А. А. Красных, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, ВятГУ (г. Киров)

А. А. Махнев, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий отделом, Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН (г. Екатеринбург)

Н. Н. Непейвода, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт программных систем РАН (г. Переславль-Залесский)

В. П. Одинец, доктор физико-математических наук, профессор, Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина (г. Сыктывкар)

С. М. Окулов, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор, ВятГУ (г. Киров)

Е. П. Петров, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, ВятГУ (г. Киров),
ORCID: 0000-0002-0336-1341

В. В. Сидоров, кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник, ВятГУ (г. Киров)

Д. А. Страбыкин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, ВятГУ (г. Киров)

И. В. Флегентов, доктор технических наук, профессор, ВятГУ (г. Киров), ORCID: 0000-0002-6569-5654

А. Г. Хлебов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, ВятГУ (г. Киров)

А. В. Частиков, доктор технических наук, профессор, ВятГУ (г. Киров), ORCID: 0000-0002-1998-7787

В. В. Черепанов, доктор технических наук, профессор, ВятГУ (г. Киров), ORCID: 0000-0002-5244-7061

В. В. Чермных, доктор физико-математических наук, доцент, профессор, ВятГУ (г. Киров)

Д. В. Чупраков, кандидат физико-математических наук, доцент, ВятГУ (г. Киров)

А. В. Шатров, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой, ВятГУ (г. Киров)

Научный журнал «Advanced science»

**как средство массовой информации зарегистрирован в Роскомнадзоре
(Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-67556 от 31 октября 2016 г.)**

Учредитель журнала – ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

Адрес издателя: 610000, г. Киров, ул. Московская, 36,
тел. (8332) 208-964 (Научное издательство ВятГУ)

Адрес редакции: 610000, г. Киров, ул. Московская, 36,
тел. (8332) 208-964 (Научное издательство ВятГУ)

Редактор **М. О. Корякина**

Компьютерная верстка **Л. А. Кислицына**

Редактор выпускающий **А. И. Чернышова**

Ответственный за выпуск **И. В. Смольняк**

Цена свободная

© Вятский государственный университет (ВятГУ), 2019

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

<i>Вечтомов Е. М.</i> О полукольце всех соответствий на множестве.....	4
--	---

ФИЗИКА

<i>Запольских С. Н.</i> Исследование и анализ электромагнитных систем с постоянным потокоцеплением с помощью физической модели.....	9
<i>Тукмаков Д. А.</i> Численное моделирование ударно-волнового течения в нейтральной и электрически заряженной газовзвесах.....	16
<i>Жаворонков В. И., Жаворонков С. И., Ситяков А. С.</i> Результаты деятельности научно-исследовательской лаборатории функциональной электроники ВятГУ	23

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Плотников С. А., Бузиков Ш. В.</i> Теоретические предпосылки определения оптимальных составов смесевых топлив.....	34
<i>Кузнецов В. Н.</i> О совместной работе синхронных машин.....	39
<i>Рублева О. А., Гороховский А. Г.</i> Посадки в клеевых соединениях на прямоугольные шипы.....	45
<i>Шишкин В. М.</i> Моделирование статической реакции балки на нелинейно упругом основании.....	50
<i>Мусихина Т. А., Мельцов В. Ю., Родыгин И. А., Ходырева О. О.</i> Особенности разработки компьютерной модели экологического паспорта микрорайона «Квартал 119».....	56

О полукольце всех соответствий на множестве*

Е. М. Вечтомов

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальной математики, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: vecht@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются свойства полукольца $R(A)$ всех соответствий (бинарных отношений) на множестве A с операциями объединения и композиции соответствий. Полукольцо $R(A)$ относительно включения соответствий является решеточно упорядоченным полукольцом. В терминах полукольца $R(A)$ описаны различные виды соответствий на множестве A . Показано, что любой изоморфизм между полукольцами $R(A)$ и $R(B)$ индуцирован биекцией между множествами A и B . Отмечена возможность применения этих результатов к доказательству определяемости произвольного топологического пространства полукольцом всех непрерывных соответствий на нем.

Ключевые слова: множество, соответствие, полукольцо соответствий, мультипликативная полугруппа соответствий, индуцированный изоморфизм.

Соответствия и операции над ними

Статья является продолжением работ автора [1; 2].

Напомним основные понятия [3, глава 1]).

Соответствием (бинарным отношением) между множествами A и B называется произвольное подмножество ρ прямого произведения множеств A и B , т. е. $\rho \subseteq A \times B$. Более точно, соответствие есть тройка $\langle A, \rho, B \rangle$, где $\rho \subseteq A \times B$ называется еще *графиком* соответствия. Запись $a\rho b$ означает, что элементы $a \in A$ и $b \in B$ находятся в отношении ρ .

Пусть даны произвольные соответствия ρ, σ, θ между множествами A и B , соответствия τ, υ между множествами B и C , соответствие ω между множествами C и D .

Соответствие ρ^{-1} между множествами B и A , $b\rho^{-1}a$ равносильно $a\rho b$ для любых элементов $a \in A$ и $b \in B$, называется *обратным* к соответствию ρ .

Соответствие $\rho\tau = \rho \cdot \tau = \text{тор}$ между множествами A и C , $a(\rho\tau)c$ при $a \in A$ и $c \in C$ означает, что $a\rho b$ и $b\tau c$ для некоторого элемента $b \in B$, называется *композицией*, или *произведением*, соответствий ρ и τ .

Если $A = B$, то соответствие ρ называется *соответствием на множестве* A . Соответствие равенства на множестве A обозначается 1_A . Пустое соответствие будем обозначать, как и пустое множество, через \emptyset .

Включение $\rho \subseteq \sigma$, *объединение* $\rho \cup \sigma$ и *пересечение* $\rho \cap \sigma$ суть теоретико-множественные включение, объединение и пересечение ρ и σ как подмножеств множества $A \times B$.

Легко видеть, что имеют место следующие **свойства соответствий**:

- 1) $(\rho^{-1})^{-1} = \rho$, $\rho \subseteq \rho\rho^{-1}\rho$;
- 2) $(\rho\tau)^{-1} = \tau^{-1}\rho^{-1}$;
- 3) $(\rho\tau)\omega = \rho(\tau\omega)$;
- 4) $1_A \cdot \rho = \rho$, $\rho \cdot 1_B = \rho$, $\emptyset \cdot \rho = \rho \cdot \emptyset = \emptyset$;
- 5) $\rho \cup \sigma = \sigma \Leftrightarrow \rho \subseteq \sigma \Leftrightarrow \rho^{-1} \subseteq \sigma^{-1}$;
- 6) $(\rho \subseteq \sigma \ \& \ \tau \subseteq \upsilon) \Rightarrow \rho\tau \subseteq \sigma\upsilon$;
- 7) $(\rho \cup \sigma) \cup \theta = \rho \cup (\sigma \cup \theta)$, $\rho \cup \sigma = \sigma \cup \rho$;
- 8) $\rho \cup \rho = \rho$, $\rho \cup \emptyset = \rho$;
- 9) $(\rho \cup \sigma) \tau = \rho\tau \cup \sigma\tau$, $\rho(\tau \cup \upsilon) = \rho\tau \cup \rho\upsilon$;
- 10) $(\rho \cup \sigma)^{-1} = \rho^{-1} \cup \sigma^{-1}$, $(\rho \cap \sigma)^{-1} = \rho^{-1} \cap \sigma^{-1}$;
- 11) $\rho \subseteq \sigma \Rightarrow \rho \cup \theta \subseteq \sigma \cup \theta$, $\rho \subseteq \sigma \Rightarrow \rho \cap \theta \subseteq \sigma \cap \theta$;
- 12) $(\rho \cap \sigma) \tau \subseteq \rho\tau \cap \sigma\tau$, $\rho(\tau \cap \upsilon) \subseteq \rho\tau \cap \rho\upsilon$.

* Статья написана в рамках государственного задания Минобрнауки РФ «Полукольца и их связи», проект № 1.5879.2017/8.9.

© Вечтомов Е. М., 2019

Образом подмножества X множества A при соответствии ρ называется множество $\rho(X) = \{b \in B: \exists a \in X \text{ } a\rho b\} \subseteq B$. Областью определения соответствия ρ называется множество $D(\rho) = \rho^{-1}(B)$. Множеством значений (образом) соответствия ρ будет множество $R(\rho) = \rho(A) = D(\rho^{-1})$. Отметим, что

$$\rho = \cup_{a \in A} (\{a\} \times \rho(\{a\})) \text{ для любого соответствия } \rho \text{ на множестве } A. \quad (1)$$

Соответствие ρ между множествами A и B называется:

всюду определенным, если $D(\rho) = A$ ($1_A \subseteq \rho\rho^{-1}$);

однозначным, если $\forall a \in A \forall b_1, b_2 \in B (a\rho b_1 \ \& \ a\rho b_2 \Rightarrow b_1 = b_2)$ ($\rho^{-1}\rho \subseteq 1_B$);

инъективным, если $\forall a_1, a_2 \in A \forall b \in B (a_1\rho b \ \& \ a_2\rho b \Rightarrow a_1 = a_2)$ ($\rho\rho^{-1} \subseteq 1_A$);

сюръективным, когда $R(\rho) = B$, т. е. $1_B \subseteq \rho^{-1}\rho$;

биективным (или взаимно однозначным), когда оно всюду определено, однозначно, инъективно и сюръективно ($\rho\rho^{-1} = 1_A$ и $\rho^{-1}\rho = 1_B$).

Всюду определенное однозначное соответствие между множествами A и B называется *функциональным, функцией* или *отображением* ($A \rightarrow B$). Всюду определенное соответствие называют также *многозначной функцией*, а однозначное соответствие – *частичной функцией*.

Соответствие ρ назовем *полным*, если $\rho = D(\rho) \times R(\rho)$. Полными соответствиями на множестве A служат *константные отображения* $\pi_a: A \rightarrow \{a\}$, $a \in A$. Константные отображения являются минимальными элементами упорядоченного множества с отношением включения \subseteq всех полных всюду определенных соответствий ρ ($= A \times R(\rho)$).

Соответствие ρ на множестве назовем *симметричным*, если $\rho^{-1} \subseteq \rho$, равносильно, $\rho^{-1} = \rho$.

Полукольца соответствий на множестве

Алгебраическая структура $\langle S, +, \cdot \rangle$ называется *полукольцом*, если $\langle S, + \rangle$ – аддитивно записанная коммутативная полугруппа, $\langle S, \cdot \rangle$ – мультипликативно записанная полугруппа, операция умножения \cdot дистрибутивна относительно операции сложения $+$ с обеих сторон: $a(b + c) = ab + ac$, $(a + b)c = ac + bc$ для всех $a, b, c \in S$.

Элемент 0 полукольца S называется *нулем*, если $s + 0 = s$ и $s \cdot 0 = 0 \cdot s = 0$ для любого $s \in S$ (нуль единственен при условии его существования). Элемент 1 полукольца S называется *единицей*, если $s \cdot 1 = 1 \cdot s = s$ для всех $s \in S$ (единица единственна при условии ее существования). Полукольцо, имеющее нуль (единицу), называется *полукольцом с нулем (полукольцом с единицей)*. Элемент s полукольца S с единицей 1 называется *обратимым*, если $st = ts = 1$ для некоторого элемента $t \in S$. Полукольцо с тождеством $x + x = x$ называется (аддитивно) *идемпотентным*. Полукольцо с коммутативным умножением само называется *коммутативным*. Элемент a полукольца S называется *правым (левым) поглощающим* элементом, если $sa = a$ ($as = a$) для всех $s \in S$.

Информацию о полукольцах можно найти в главе 1 книги [6].

Рассмотрим теперь множество $\mathbf{R}(A)$ всевозможных соответствий на непустом множестве A . Относительно операций объединения \cup (сложение) и композиции \cdot (умножение) множество $\mathbf{R}(A)$ оказывается полукольцом в силу свойств 7), 3) и 9). На основании свойств 4) и 8) $\langle \mathbf{R}(A), \cup, \cdot \rangle$ – идемпотентное полукольцо с нулем \emptyset и единицей 1_A . Поскольку на полукольце $\mathbf{R}(A)$ имеется естественный порядок \subseteq со свойствами 11) и 6), то $\langle \mathbf{R}(A), \cup, \cdot, \subseteq \rangle$ является упорядоченным полукольцом с наименьшим элементом \emptyset и наибольшим элементом – полным соответствием $A \times A$. Упорядоченное множество $\mathbf{R}(A)$ совпадает с булеаном $\mathbf{B}(A \times A)$ – множеством всех подмножеств множества $A \times A$. Поэтому упорядоченное полукольцо $\mathbf{R}(A)$ будет *решеточно упорядоченным полукольцом*. Поскольку в свойстве 12) включение, вообще говоря, строгое, когда A содержит не менее двух элементов, то в этом случае алгебраическая структура $\langle \mathbf{R}(A), \cap, \cdot \rangle$ не будет полукольцом.

Предложение 1. Для любого непустого множества A алгебраическая система $\langle \mathbf{R}(A), \cup, \cdot, \subseteq \rangle$ является решеточно упорядоченным полукольцом.

Предложение 2. Отображение $\rho \rightarrow \rho^{-1}$, $\rho \in \mathbf{R}(A)$, является антиавтоморфизмом полукольца $\mathbf{R}(A)$.

Доказательство. По свойствам 1), 2) и 10) операция взятия обратного соответствия на полукольце $\mathbf{R}(A)$ будет инволюцией, сохраняющей операцию объединения, отношение включения и переставляющей сомножители в композиции соответствий.

Замечание 1. Указанные свойства 1), 2), 10) показывают, что для соответствий выполняется **принцип двойственности:**

если имеется некоторое предложение о соответствиях и операциях объединения и композиции над ними, то, заменяя соответствия на обратные к ним, сохраняя объединения и переставляя сомножители в композициях, получим двойственное предложение, эквивалентное исходному предложению.

Так, в свойстве 9) законы дистрибутивности двойственны друг другу. Поэтому достаточно доказать один из законов дистрибутивности, а другой получится из доказанного по принципу двойственности.

Пусть $Ann_l \rho = \{\chi \in \mathbf{R}(A): \chi\rho = \emptyset\}$, $Ann_r \rho = \{\chi \in \mathbf{R}(A): \rho\chi = \emptyset\}$ – соответственно левый и правый аннуляторы соответствия $\rho \in \mathbf{R}(A)$. По свойствам 3) и 9) получаем левый идеал $Ann_l \rho$ и правый идеал $Ann_r \rho$ в полукольце $\mathbf{R}(A)$.

Лемма 1. Для любых соответствий $\rho, \sigma \in \mathbf{R}(A)$ верны следующие утверждения:

1. $\rho\sigma = \emptyset \Leftrightarrow R(\rho) \cap D(\sigma) = \emptyset$.
2. $D(\rho) \subseteq D(\sigma) \Leftrightarrow Ann_l \sigma \subseteq Ann_l \rho$.
3. $D(\rho) = D(\sigma) \Leftrightarrow Ann_l \sigma = Ann_l \rho$.
4. $R(\rho) \subseteq R(\sigma) \Leftrightarrow Ann_r \sigma \subseteq Ann_r \rho$.
5. $R(\rho) = R(\sigma) \Leftrightarrow Ann_r \sigma = Ann_r \rho$.

Доказательство. Утверждение 1 вытекает из определений. Утверждения 2 и 4 следуют из 1. Импликации $2 \Rightarrow 3$ и $4 \Rightarrow 5$ очевидны.

Введем в рассмотрение некоторые важные и интересные подполукольца полукольца $\mathbf{R}(A)$.

Положим: $\mathbf{DR}(A)$ – множество всех всюду определенных соответствий на A ; $\mathbf{IR}(A)$ – множество всех сюръективных соответствий на A ; $\mathbf{SR}(A)$ – множество всех симметричных соответствий на A . Ясно, что множества $\mathbf{DR}(A)$ и $\mathbf{IR}(A)$ будут подполукольцами с единицей и без нуля в полукольце $\mathbf{R}(A)$, а $\mathbf{SR}(A)$ – коммутативным, в силу свойства 2), подполукольцом с нулем и единицей в полукольце $\mathbf{R}(A)$.

Лемма 2. Для соответствия $\rho \in \mathbf{R}(A)$ верны следующие утверждения:

1. $\rho \in \mathbf{DR}(A) \Leftrightarrow Ann_l \rho = \{\emptyset\}$.
2. $\rho \in \mathbf{IR}(A) \Leftrightarrow Ann_r \rho = \{\emptyset\}$.
3. ρ является правым поглощающим элементом полукольца $\mathbf{DR}(A) \Leftrightarrow \rho$ есть полное, всюду определенное соответствие.
4. ρ является левым поглощающим элементом полукольца $\mathbf{IR}(A) \Leftrightarrow \rho$ есть полное сюръективное соответствие.

Доказательство. Утверждения 1 и 2 вытекают из утверждения 1 леммы 1, а утверждения 3 и 4 взаимно двойственны.

Докажем утверждение 3. Достаточность \Leftarrow очевидна. Предположим, что всюду определенное соответствие ρ на множестве A не является полным. Тогда существуют такие $a, b \in A$ и $c \in Im \rho$, что brc и $\neg(arc)$, т. е. brc истинно и arc ложно. Для константного отображения π_b получаем $a(\pi_b\rho)c$. Откуда $\pi_b\rho \neq \rho$. Значит, соответствие ρ не будет правым поглощающим элементом полукольца $\mathbf{DR}(A)$.

Лемма 3. Для произвольного соответствия $\rho \in \mathbf{R}(A)$ следующие утверждения эквивалентны:

1. ρ есть константное отображение, т. е. $\rho = \pi_a$ для некоторого элемента $a \in A$.
2. ρ – минимальный элемент упорядоченного множества всех полных, всюду определенных соответствий на множестве A .
3. ρ всюду определено и существует единственное ненулевое соответствие $\sigma \in \mathbf{R}(A)$, для которого $D(\sigma) \subseteq R(\rho)$ и $R(\sigma) \subseteq R(\rho)$.

Доказательство. Ясно, что $1 \Leftrightarrow 2$. Эквивалентность утверждений 1 и 3 вытекает из [7, lemma (2.10)].

Легко видеть, что имеют место три следующие леммы:

Лемма 4. Соответствие $\rho \in \mathbf{R}(A)$ является обратимым элементом полукольца $\mathbf{R}(A) \Leftrightarrow \rho$ есть биекция множества A на само себя.

Лемма 5. Для любых соответствий $\rho, \sigma \in \mathbf{R}(A)$ равносильны следующие утверждения:

1. $\rho \subseteq \sigma$.
2. $R(\pi\rho) \subseteq R(\pi\sigma)$ для всякого константного отображения π из $\mathbf{R}(A)$.

Лемма 6. Соответствие $\rho \in \mathbf{R}(A)$ является полным \Leftrightarrow соответствие $\pi\rho$ будет полным, всюду определенным соответствием для любого константного соответствия $\pi \in \mathbf{R}(A)$, такого, что $\pi\rho \neq \emptyset$.

Лемма 7. Каждое соответствие $\rho \in \mathbf{R}(A)$ однозначно определяется включениями $\pi_a\rho \supseteq \pi_c$, где $a, c \in A$.

Действительно, для любых $a, c \in A$ имеем:

$$arc \Leftrightarrow c \in R(\pi_a\rho) \Leftrightarrow \pi_a\rho \supseteq \pi_c. \quad (2)$$

Замечание 2. Леммы 1–7 показывают, что свойства соответствий на произвольном непустом множестве A выражается на языке операции композиции, т. е. в терминах мультипликативной подгруппы полукольца $\mathbf{R}(A)$. Но если вместо полукольца $\mathbf{R}(A)$ взять его подполукольцо $\mathbf{DR}(A)$, то в лемме 3 для алгебраического описания константных отображений годится только утверждение 2, использующее порядок \subseteq (определяемый операцией объединения \cup), т. е. константные отображения на множестве A характеризуются в терминах полукольца $\mathbf{DR}(A)$; то же самое относится и к полукольцевой определяемости соответствий согласно формуле (2).

Изоморфизмы полуколец соответствий

Опишем все изоморфизмы полуколец $\mathbf{R}(A)$ и $\mathbf{R}(B)$ соответствий на любых (непустых) множествах A и B .

Возьмем произвольную биекцию $f: A \rightarrow B$. Она индуцирует изоморфизм α_f полукольца $\mathbf{R}(A)$ на полукольцо $\mathbf{R}(B)$ по следующему правилу:

$$f(x)\alpha_f(\rho)f(y) \Leftrightarrow x\rho y \text{ для любых } \rho \in \mathbf{R}(A), x, y \in A. \quad (3)$$

Кроме того, имеем биекцию $f \times f: A \times A \rightarrow B \times B$, $(f \times f)(x, y) = (f(x), f(y))$, которая порождает изоморфизм $\mathbf{f} \times \mathbf{f}: \mathbf{B}(A \times A) \rightarrow \mathbf{B}(B \times B)$ булеана $\mathbf{B}(A \times A)$ на булеан $\mathbf{B}(B \times B)$ [1, следствие 3]. В результате $\alpha_f = \mathbf{f} \times \mathbf{f}$ -индуцированная – биекцией f – биекция между полукольцами $\mathbf{R}(A)$ и $\mathbf{R}(B)$.

Предложение 3. Для любой биекции $f: A \rightarrow B$ индуцированная биекция α_f является изоморфизмом полукольца $\mathbf{R}(A)$ на полукольцо $\mathbf{R}(B)$.

Доказательство. Остается проверить, что α_f сохраняет операцию композиции соответствий, т. е. $\alpha_f(\rho\sigma) = \alpha_f(\rho)\alpha_f(\sigma)$ при любых $\rho, \sigma \in \mathbf{R}(A)$. В силу (3) и приведенных выше определений получаем:

$$\begin{aligned} \alpha_f(\rho\sigma) &= (\mathbf{f} \times \mathbf{f})(\rho\sigma) = \{(f(x), f(y)): x(\rho\sigma)y\} = \{(f(x), f(y)): \exists z \in A (x\rho z \& z\sigma y)\} = \\ &= \{(f(x), f(y)): \exists f(z) \in B (f(x)\alpha_f(\rho)f(z) \& f(z)\alpha_f(\sigma)f(y))\} = \\ &= \{(f(x), f(y)): f(x)(\alpha_f(\rho)\alpha_f(\sigma))f(y)\} = \alpha_f(\rho)\alpha_f(\sigma). \end{aligned}$$

Полукольцевые изоморфизмы $\alpha_f: \mathbf{R}(A) \cong \mathbf{R}(B)$ по биекциям $f: A \rightarrow B$ будем называть *индуцированными*.

Предложение 4. Изоморфизмы полукольца $\mathbf{R}(A)$ на полукольцо $\mathbf{R}(B)$ совпадают с индуцированными изоморфизмами.

Доказательство. В силу предложения 3 индуцированные изоморфизмы α_f являются полукольцевыми изоморфизмами.

Обратно, пусть $\alpha: \mathbf{R}(A) \rightarrow \mathbf{R}(B)$ – произвольный полукольцевой изоморфизм. Определим биекцию $f: A \rightarrow B$, для которой $\alpha = \alpha_f$. В силу леммы 2 изоморфизм α устанавливает взаимно однозначное соответствие между множеством $\{\pi_a: a \in A\}$ константных отображений полукольца $\mathbf{R}(A)$ и множеством $\{\pi_b: b \in B\}$ константных отображений полукольца $\mathbf{R}(B)$. Получаем биекцию $f: A \rightarrow B$, такую, что

$$f(a) = b \Leftrightarrow \alpha(\pi_a) = \pi_b \text{ для любых } a \in A \text{ и } b \in B. \quad (4)$$

Покажем, что $\alpha(\rho) = \alpha_f(\rho)$ для каждого $\rho \in \mathbf{R}(A)$. Пусть $b, d \in B$, $f(a) = b$ и $f(c) = d$ для подходящих $a, c \in A$. Тогда $\alpha(\pi_a) = \pi_b$ и $\alpha(\pi_c) = \pi_d$. На основании (4), (3) и (2) имеем:

$$\begin{aligned} b\alpha_f(\rho)d &\Leftrightarrow f(a)\alpha_f(\rho)f(c) \Leftrightarrow a\rho c \Leftrightarrow \pi_a\rho \supseteq \pi_c \Leftrightarrow \alpha(\pi_a\rho) \supseteq \alpha(\pi_c) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \alpha(\pi_a)\alpha(\rho) \supseteq \alpha(\pi_c) \Leftrightarrow \pi_b\alpha(\rho) \supseteq \pi_d \Leftrightarrow b\alpha(\rho)d. \end{aligned}$$

Предложение доказано.

Дополнение

Если A – топологическое пространство, то можно рассмотреть полукольцо $\mathbf{CR}(A)$ всех непрерывных соответствий на A с теми же операциями объединения и композиции соответствий. Соответствие ρ на топологическом пространстве A назовем *непрерывным* (в [2] такие соответствия названы строго непрерывными), если образ $\rho^{-1}(U)$ любого открытого множества U пространства A (при соответствии ρ^{-1}) есть открытое множество в A . Легко видеть, что объединение и композиция всяких двух непрерывных соответствий на топологическом пространстве суть непрерывные соответствия на этом пространстве. Полукольцо $\mathbf{CR}(A)$ решеточно упорядоченное и является подполукольцом полукольца $\mathbf{R}(A)$. Отметим, что полные всюду определенные соответствия на A являются непрерывными, в частности непрерывными будут константные отображения π_a , $a \in A$.

Используя приведенные выше рассуждения, можно доказать следующую **теорему определяемости**:

Каждое топологическое пространство A однозначно, с точностью до гомеоморфизма, определяется полукольцом $\mathbf{CR}(A)$ всех непрерывных соответствий на A .

Отметим, что проблеме определяемости топологических пространств различными алгебраическими системами непрерывных функций на них посвящены обзорные статьи [4; 5, глава 1].

Замечание 3. Замкнутые соответствия на топологическом пространстве A , т. е. соответствия, являющиеся замкнутыми подмножествами тихоновского произведения $A \times A$, изучал К. Maggil [7]. Он назвал T_1 -пространство A σ -пространством в случае, когда композиция любых двух замкнутых соответствий на A также будет замкнутым соответствием, и обозначил через $\sigma[A]$ полугруппу всех замкнутых соответствий на σ -пространстве A с операцией композиции соответствий. Отметим, что объединение двух замкнутых соответствий на топологическом пространстве всегда будет замкнутым соответствием. Поэтому $\sigma[A]$ является подполукольцом полукольца $\mathbf{R}(A)$ для всякого σ -пространства A .

Maggil описал все изоморфизмы полугрупп $\sigma[A]$ и $\sigma[B]$, доказав следующую **теорему** [7, theorem (3.3)]:

Для любой биекции α между полугруппами $\sigma[A]$ и $\sigma[B]$ замкнутых соответствий на произвольных σ -пространствах A и B эквивалентны следующие утверждения:

α – изоморфизм;

существует гомеоморфизм f пространства A на пространство B , такой, что $\alpha(\rho) = f^{-1}\rho f$ для всех соответствий $\rho \in \sigma[A]$;

$\alpha = \alpha_f$ для некоторого гомеоморфизма f пространства A на пространство B .

Для дискретного пространства A имеем $\sigma[A] = \mathbf{R}(A)$. Поэтому из данной теоремы и предложения 3 вытекает предложение 4, а также

Следствие. Мультипликативные изоморфизмы полуколец $\mathbf{R}(A)$ и $\mathbf{R}(B)$ являются полукольцевыми изоморфизмами.

Список литературы

1. Вечтомов Е. М. Бинарные отношения и гомоморфизмы булеанов // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1 : Математика, механика, информатика. 2019. Вып. 1 (30). С. 3–15.
2. Вечтомов Е. М. О непрерывных соответствиях между топологическими пространствами // Advanced science. 2019. № 3. С. 4–9.
3. Вечтомов Е. М. Математика: основные математические структуры : учебное пособие для академического бакалавриата. 2-е изд. М. : Юрайт, 2018. 296 с.
4. Вечтомов Е. М. О Вопросы определяемости топологических пространств алгебраическими системами непрерывных функций // Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР. Алгебра. Топология. Геометрия. 1990. Т. 28. С. 3–46.
5. Вечтомов Е. М. Кольца непрерывных функций. Алгебраические аспекты // Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР. Алгебра. Топология. Геометрия. 1991. Т. 29. С. 119–191.
6. Вечтомов Е. М., Лубягина Е. Н., Чермных В. В. Элементы теории полуколец : монография. Киров : Радуга-ПРЕСС, 2012. 228 с.
7. Maggil K. D. Isomorphisms of trifirm semigroups // J. Austral Math. Soc. 1969. Vol. 10. Pp. 185–193.

On the half-ring of all correspondences on the set

E. M. Vechtomov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the Department of fundamental mathematics, Vyatka State University, Russia, Kirov. E-mail: vecht@mail.ru

Abstract. We consider the properties of the semicircle $\mathbf{R}(A)$ of all correspondences (binary relations) on the set A with the operations of combining and composing correspondences. The half-ring $\mathbf{R}(A)$ with respect to the inclusion of correspondences is a lattice-ordered half-ring. In terms of the half-ring $\mathbf{R}(A)$, various kinds of correspondences are described on the set A . It is shown that any isomorphism between the half-rings $\mathbf{R}(A)$ and $\mathbf{R}(B)$ is induced by a bijection between the sets A and B . The possibility of applying these results to the proof of determinability of an arbitrary topological space by a semicircle of all continuous correspondences on it is noted.

Keywords: set, correspondence, semi-ring of correspondences, multiplicative semigroup of correspondences, induced isomorphism.

References

1. Vechtomov E. M. *Binarnye otnosheniya i gomomorfizmy buleanov* [Binary relations and homomorphisms of Booleans] // *Vestnik Syktyvkarского университета. Seriya 1 : Matematika, mekhanika, informatika* – Herald of Syktyvkar University. Series 1 : Mathematics, mechanics, computer science. 2019. Is. 1 (30). Pp. 3–15.
2. Vechtomov E. M. *O nepreryvnyh sootvetstviyah mezhdru topologicheskimi prostranstvami* [On continuous correspondences between topological spaces] // *Advanced science*. 2019. No. 3. Pp. 4–9.
3. Vechtomov E. M. *Matematika: osnovnye matematicheskie struktury : uchebnoe posobie dlya akademicheskogo bakalavriata* [Mathematics: basic mathematical structures : a textbook for academic baccalaureate. 2nd ed.] M. Yurayt. 2018. 296 p.
4. Vechtomov E. M. *O Voprosy opredelyaemosti topologicheskikh prostranstv algebraicheskimi sistemami nepreryvnyh funktsiy* [Questions of definability of topological spaces by algebraic systems of continuous functions] // *Itoги nauki i tekhniki. VINITI AN SSSR. Algebra. Topologiya. Geometriya* – Results of science and technology. All-Union Institute of scientific and technical information, USSR AS. Algebra. Topology. Geometry. 1990. Vol. 28. Pp. 3–46.
5. Vechtomov E. M. *Kol'ca nepreryvnyh funktsiy. Algebraicheskie aspekty* [Rings of continuous functions. Algebraic aspects] // *Itoги nauki i tekhniki. VINITI AN SSSR. Algebra. Topologiya. Geometriya* – Results of science and technology. All-Union Institute of scientific and technical information, USSR AS. Algebra. Topology. Geometry. 1991. Vol. 29. Pp. 119–191.
6. Vechtomov E. M., Lubyagina E. N., Chermnyh V. V. *Elementy teorii polukolec : monografiya* [Elements of the theory of semirings : monograph]. Kirov. Raduga-PRESS. 2012. 228 p.
7. Maggil K. D. Isomorphisms of trifirm semigroups // *J. Austral Math. Soc.* 1969. Vol. 10. Pp. 185–193.

Исследование и анализ электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением с помощью физической модели

С. Н. Запольских

кандидат технических наук, доцент, Вятский государственный университет.
Россия, г. Киров. ORCID: 0000-0001-5042-6403. E-mail: zapose8@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены основные принципы работы систем с индуктивными накопителями энергии, в которых вначале происходит предварительное накопление магнитной энергии, а затем преобразование ее в другие виды энергии при постоянном потокосцеплении, для таких систем упрощается конструкция и повышаются энергетические показатели. В настоящее время элементная база и микропроцессорные технологии достигли достаточно высокого уровня, чтобы в полном объеме осуществить практическое применение такого принципа преобразования энергий и проводить исследования электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением. Рассматривается физическая модель, в которой дифференциальные и интегральные уравнения, описывающие физические процессы, происходящие в системах с постоянным потокосцеплением, решаются аналитическими методами. Полученные результаты подтверждают повышение энергетических характеристик. Такие исследования на физической модели необходимы для разработки последующих более точных численных математических моделей и для изучения электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением. Результаты работы также могут быть использованы в учебных целях.

Ключевые слова: электромеханические системы, моделирование, накопители магнитной энергии, системы с постоянным потокосцеплением.

Современные возможности управления и появление мощной и быстродействующей коммутационной техники способствует исследованию и разработке систем с предварительным накоплением магнитной энергии или с индуктивными накопителями энергии, работающих при постоянном потокосцеплении. В таких электромагнитных системах необходимы переключения больших электрических токов с высокой частотой. Современная элементная база позволяет осуществить такой режим работы. Это подтверждает бурное развитие инверторных источников питания, которые сделали, по сути дела, революцию в сварочном производстве, позволив уменьшить размеры и повысить мощность сварочных источников благодаря повышению частоты понижающих трансформаторов до 10^5 Гц с помощью коммутирующих элементов. Кроме того, коммутирующие элементы в сварочных инверторах хорошо управляются микропроцессорами, что позволило настраивать огромное количество различных режимов сварки. Современные коммутирующие элементы передают мощность порядка 10 кВт (один транзистор) и обеспечивают частоту коммутации 75 кГц, разрабатываются приборы с более высокими характеристиками. Такие достижения наблюдаются наряду с применением современных математических пакетов программ высокого уровня типа MathCAD, позволяющих записывать математические выражения в привычном виде, как принято в математической, физической и технической литературе. Это позволяет не тратить время на составление рутинных расчетных выражений и алгоритмов, а прямо физические формулы, уравнения и любые другие выражения последовательно записывать в программы численных моделей. Такие пакеты полезны для обучения студентов и помогут значительно продвинуться в численном моделировании, там, где необходимо использование дифференциальных и интегральных уравнений, в частности при разработке электромагнитных систем с постоянным потокосцеплением.

В электромеханических преобразователях и трансформаторах мощности магнитное поле и основная магнитная энергия создаются в рабочих немагнитных зазорах, и через эту магнитную энергию согласно современным представлениям осуществляются энергетические преобразования. Электрическая энергия источников питания электрических двигателей преобразуется в магнитную и механическую энергию. В электрических генераторах механическая энергия привода преобразуется в магнитную и электрическую энергию нагрузки. В традиционных машинах такое преобразо-

вание осуществляется одновременно. Например, в электрических генераторах нагрузка остается подключенной к обмотке в течение всего цикла работы, а механическая энергия привода преобразуется в магнитную энергию, которая одновременно преобразуется в электрическую энергию нагрузки. Системы с индуктивными накопителями энергии с предварительным накоплением магнитной энергии, работающие при постоянном потокосцеплении, отличаются тем, что преобразование энергий в них разделяется во времени. Вначале происходит накопление магнитной энергии, а затем преобразование ее в другие виды энергии.

Теория энергопреобразования в электромагнитных двигателях принадлежит русским ученым Н. П. Ряшенцеву и В. Н. Ряшенцеву (1985 г.) [5]. Они показали, что для повышения эффективности преобразования энергии электромагнитных двигателей необходимо: во-первых, уменьшить начальную индуктивность, во-вторых, проводить энергопреобразование при постоянном потокосцеплении. Способ энергопреобразования при постоянном потокосцеплении в электромагнитной машине может быть реализован следующим образом: в крайнем положении вторичной части при минимальной индуктивности или максимальном магнитном сопротивлении рабочих зазоров к обмотке подключается источник питания. Когда накопится достаточное количество магнитной энергии в рабочих зазорах, источник питания отключается, а обмотка замыкается накоротко. Далее происходит процесс преобразования накопленной магнитной энергии в работу электромагнитной силы. Было показано, что для таких систем работа электромагнитной силы определяется выражением

$$W = \frac{\Psi^2}{2} \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_m} \right), \quad (1)$$

где Ψ – потокосцепление, L_0 и L_m – индуктивность в начале такта при максимальном магнитном сопротивлении и в конце такта при минимальном магнитном сопротивлении в рабочих зазорах.

Согласно этому выражению, может быть преобразована очень большая энергия.

Принцип преобразования энергии при постоянном потокосцеплении впервые на практике был реализован тоже русскими учеными и инженерами, среди которых Н. П. Ряшенцев, Г. Г. Угаров и А. В. Львицын (1989 г.) в линейных электромагнитных двигателях с удержанием якоря [4]. В таких двигателях осуществляется искусственная задержка якоря на этапе трогания якоря, когда магнитное сопротивление в рабочих зазорах максимальное или индуктивность обмотки минимальная, другим небольшим электромагнитом. В результате этого повышается электрический ток и накапливается магнитная энергия. Для такого двигателя было получено повышение энергии удара в четыре раза, а повышение КПД более чем в два раза.

Современные достижения в технике позволяют разрабатывать электромагнитные системы с постоянным потокосцеплением в направлении схемных решений с использованием мощных и быстродействующих коммутирующих элементов, управляемых по сигналам датчиков положения вторичной части или датчиков, выполняющих их функцию, управляемых микропроцессором.

Целью работы является оценка возможностей электромагнитных систем, работающих в режиме с постоянным потокосцеплением с помощью физической модели, для которой были бы учтены основные свойства объекта, а решения дифференциальных и интегральных уравнений физических процессов получены в аналитическом виде. Другой целью является получение информации о системах с постоянным потокосцеплением для разработки последующих программ численных моделей. Такая модель также должна быть полезной и являться основой для построения различных типов электромеханических устройств, включая электрические машины постоянного тока и асинхронные двигатели, работающие в режиме постоянного потокосцепления. Моделирование на физических моделях и моделирование на численных моделях требует более глубокого знания и понимания физических законов и математики, как и любое другое программирование в первую очередь требует знания и понимания самого объекта программирования.

Конструктивной основой модели взят электромагнитный двигатель (рис. 1а). Такое электромеханическое устройство также может работать в режиме электрического генератора. Из таких элементов могут быть построены электрические двигатели или генераторы непрерывного вращательного и линейного движения.

Уравнения, описывающие электромагнитные процессы, представлены известным уравнением электрической цепи

$$iR = U(x) - \frac{d\Psi}{dt} \quad (2)$$

и уравнения магнитной цепи (рис. 1б)

$$R_M(x, \Phi)\Phi = (R_{M\delta}(x) + R_{MM}(\Phi))\Phi = wi, \quad (3)$$

где $U(x)$ – напряжение на зажимах обмотки; i – электрический ток; $\Psi = w\Phi$ – потокосцепление; w – число витков; Φ – магнитный поток; R – активное сопротивление; $R_M(x, \Phi)$ – полное магнитное сопротивление; $R_{M\delta}(x)$ – магнитное сопротивление рабочих зазоров, $R_{MM}(\Phi)$ – магнитное сопротивление стальных сердечников магнитной цепи.

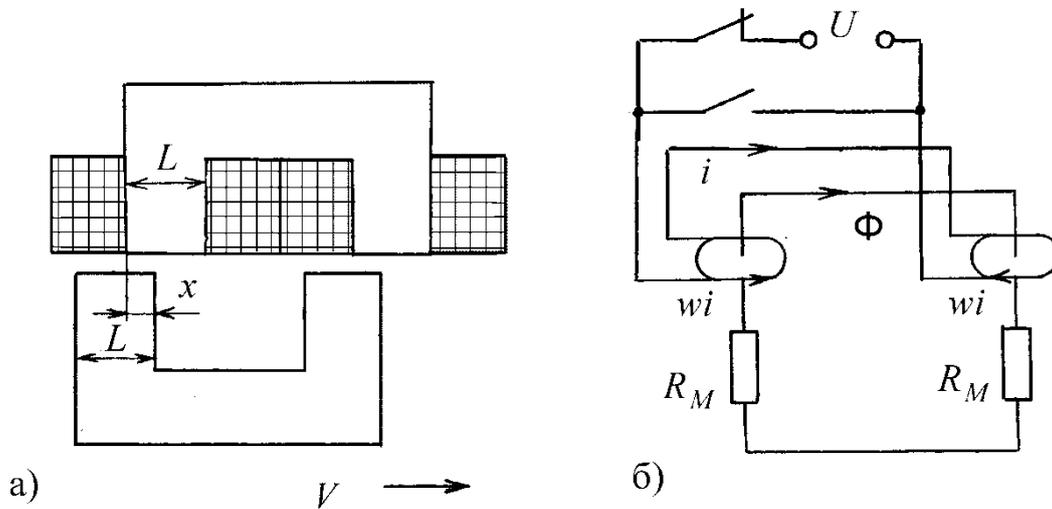


Рис. 1. Электромагнитный двигатель: а – конструктивная схема; б – эквивалентные схемы электрической и магнитной цепей

Уравнение (3) является следствием закона полного тока

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^N i_k, \tag{4}$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля; L – замкнутый контур интегрирования, охватывающий токи i_k .

Чтобы получить решение системы уравнений (2) и (3), в аналитическом виде пренебрегается потерями в обмотках и магнитном материале сердечников. Кроме того, скорость движения V вторичной части считаем постоянной, а магнитное сопротивление в рабочих зазорах – линейной функцией перемещения x и времени t :

$$R_M = R_{M0} \left(1 - \frac{x}{L} \right) = R_{M0} \left(1 - \frac{t}{T} \right), \tag{5}$$

где R_{M0} – магнитное сопротивление рабочих зазоров в начальном положении вторичной части при максимальном магнитном сопротивлении, L – длина полюсов; T – длительность такта.

Напряжение задается в виде импульса длительностью t_p и амплитудой U_p . Режим работы $t_p \rightarrow 0$ соответствует импульсному режиму работы с накоплением магнитной энергии в начале такта и энергопреобразованию при постоянном потокосцеплении. Режим $t_p = T$ характеризует традиционный режим работы двигателя, с непрерывной подачей энергии от источника питания.

Из уравнений (2) и (3) получены выражения для магнитного потока и электрического тока:

$$\Phi = \begin{cases} \frac{\Phi_{\max}}{t_H} t \text{ при } t \leq t_H \\ \Phi_{\max} \text{ при } t_H < t \leq T \end{cases}; \tag{6}$$

$$i = \begin{cases} \frac{R_M \Phi_{\max}}{wt_H} t \text{ при } t \leq t_H \\ \frac{R_M \Phi_{\max}}{w} \text{ при } t_H < t \leq T \end{cases}. \tag{7}$$

Магнитный поток ограничен из-за насыщения магнитного материала сердечников:

$$\Phi \leq \Phi_{\max} = B_{\text{нас}} S_{\min}, \quad (8)$$

где $B_{\text{нас}}$ – индукция магнитного поля, соответствующая магнитному насыщению в самом узком сечении стальных сердечников S_{\min} .

Выражение для амплитуды импульса напряжения получено из уравнения (2).

$$U = \frac{2\omega\Phi_{\max}}{t_p}. \quad (9)$$

Из этого уравнения следует, что при уменьшении длительности импульса напряжения его амплитуда увеличивается. Параметры импульса напряжения: длительность и амплитуда, так как они связаны с магнитным потоком, могут быть использованы для изменения магнитного потока в стальных сердечниках и для управления, таким образом, мощностью и частотой работы двигателями в системах управления с обратной связью. В качестве датчика обратной связи в этом случае может использоваться обычная обмотка из тонкого провода, расположенная вплотную на одном из стальных сердечников, магнитный поток в котором может рассчитываться по формуле (2). Для выявления других параметров автоматического управления в системах с обратной связью необходимо провести еще исследования, которые как раз и можно будет осуществить с помощью информации, полученной с помощью разрабатываемых физических и численных математических моделей.

Баланс энергий в виде бесконечно малых величин в общем виде, согласно (2) и (3), может быть записан:

$$Uidt = d(R_M \Phi^2) - \Phi^2 dR_M, \quad (10)$$

где $dW_{\text{ИСТ}} = Uidt$ – работа, совершаемая источником питания; $dW_{\text{МАГ}} = d(R_M \Phi^2)$ – магнитная энергия в рабочих зазорах; $dW_{\text{МЕХ}} = -\Phi^2 dR_M$ – работа электромагнитной силы, которая включает в себя механическую работу и кинетическую энергию подвижных частей.

Интегрируя выражение (10) по времени от момента $t = 0$ до $t < t_p$, получим:

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t^3}{T} \right) = \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{t^3}{T} \right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3t_p^2 T} t^3. \quad (11)$$

В этом уравнении:

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t^3}{T} \right) - \text{работа источника питания};$$

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{t_p^2} \left(t^2 - \frac{t^3}{T} \right) - \text{накапливаемая магнитная энергия};$$

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3t_p^2 T} t^3 - \text{работа электромагнитной силы}.$$

В момент окончания действия импульса напряжения, когда $t = t_p$, получим:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t_p}{T} \right) = R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t_p}{T} \right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3T} t_p. \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (10) по времени от момента $t = 0$ до $t_p < t \leq T$, получим:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t_p}{T} \right) = R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T} \right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3T} t_p + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{T} (t - t_p). \quad (13)$$

В этом уравнении:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{t_p}{T} \right) - \text{работа источника питания};$$

$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)$ – расходуемая магнитная энергия;

$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3T} t_P + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{T} (t - t_P)$ – работа электромагнитной силы.

С помощью полученных уравнений теперь можно сравнить режимы работы: непрерывный традиционный режим и режим с постоянным потокосцеплением. Для непрерывного режима работы, когда $t_P = T$, из уравнения (12) следует, что работа источника питания равна лишь 1/3 части магнитной энергии, которая может накопиться в электромагнитной системе двигателя, то есть:

$$\frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{3} \quad (14)$$

Эта энергия преобразуется в такую же работу электромагнитной силы.

Для импульсного режима работы с постоянным потокосцеплением, когда длительность импульса напряжения стремится к нулю, уравнение (13) запишется:

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 = R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right) + \frac{R_{M0} \Phi_{\max}^2}{T} t \quad (15)$$

Из этого уравнения следует, что источник питания совершает работу, равную магнитной энергии, которую может запасти электромагнитная система

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \quad (16)$$

Запасенная таким образом магнитная энергия, убывая как

$$R_{M0} \Phi_{\max}^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right), \quad (17)$$

преобразуется в работу электромагнитной силы, в конце такта равную запасенной магнитной энергии.

Таким образом, в двигателях с постоянным потокосцеплением по сравнению с двигателями с непрерывным питанием работа электромагнитной силы возрастает в три раза, что получилось немного меньше, чем в опытных данных [4]. В разрабатываемых численных моделях возрастание работы электромагнитной силы получается выше [1; 2]. Кроме того, повышение работы электромагнитной силы приводит к уменьшению времени такта работы двигателя. Поэтому для возвратно-поступательных двигателей и двигателей непрерывного движения, в которых перемещение состоит из нескольких циклов энергопреобразования, мощность дополнительно возрастает еще за счет увеличения числа тактов, совершаемых за единицу времени.

В этой физической модели электрические и магнитные потери не учитывались, поэтому информация о возрастании КПД не получена. В разрабатываемых численных моделях потери учитываются, и КПД в электромагнитных системах с постоянным потокосцеплением по сравнению с традиционными системами тоже возрастает. Особенно сильное возрастание КПД получается в электромагнитных системах с малым коэффициентом модуляции магнитного сопротивления или модуляции индуктивности при использовании изобретения [3], в котором остающаяся магнитная энергия в конце такта используется в последующем цикле работы. Для электромагнитных двигателей коэффициент модуляции равен приблизительно трем. То есть магнитное сопротивление или индуктивность при перемещении якоря из начального положения в конечное положение изменяется в три раза. Результаты, получаемые с помощью численных моделей, будут опубликованы в последующих работах.

Формула (1) показывает, что причина возрастания работы электромагнитной силы в электромагнитных двигателях заключается только в уменьшении индуктивности или повышении магнитного сопротивления в начале такта. Результаты проведенных исследований показывают, что работа электромагнитной силы при переходе к режиму работы с постоянным потокосцеплением возрастает всего лишь в три раза. Дальнейшее повышение работы возможно, как для традиционных двигателей, так и для двигателей с постоянным потокосцеплением, только за счет повышения накопительных свойств электромагнитной системой магнитной энергии, то есть повышением магнитного сопротивления рабочих зазоров или уменьшением индуктивности в начале такта. Повы-

шение накопительных свойств электромагнитных систем можно получить в системах с несколькими обмотками.

Работа электрического генератора постоянного тока, содержащая две обмотки, в режиме постоянного потокосцепления представлена на рис. 2. При разомкнутой обмотке вторичной части в обмотку первичной части подается электрический ток и создается магнитный поток Φ (рис. 2а), после чего эта обмотка замыкается накоротко. Затем замыкается накоротко обмотка вторичной части и при ее вращении магнитный поток «увлекается» этой короткозамкнутой обмоткой (рис. 2б). При повороте вторичной части на угол π (рис. 2в), когда максимально «деформируются» силовые линии магнитного поля, накапливается магнитная энергия, а магнитное сопротивление R_{MD} достигает максимального значения, подключается нагрузка, и вся запасенная магнитная энергия преобразуется в электрическую энергию нагрузки. При обратном вращении вторичной части, если нагрузка не подключена и обмотка вторичной части остается короткозамкнутой, машина будет уже работать в режиме электрического двигателя. В таких машинах магнитное сопротивление достигает более высоких значений, чем в электромагнитных двигателях. Недостатком такой машины может быть необходимость использования скользящих контактов для подключения подвижной обмотки, по которой должен протекать большой электрический ток.

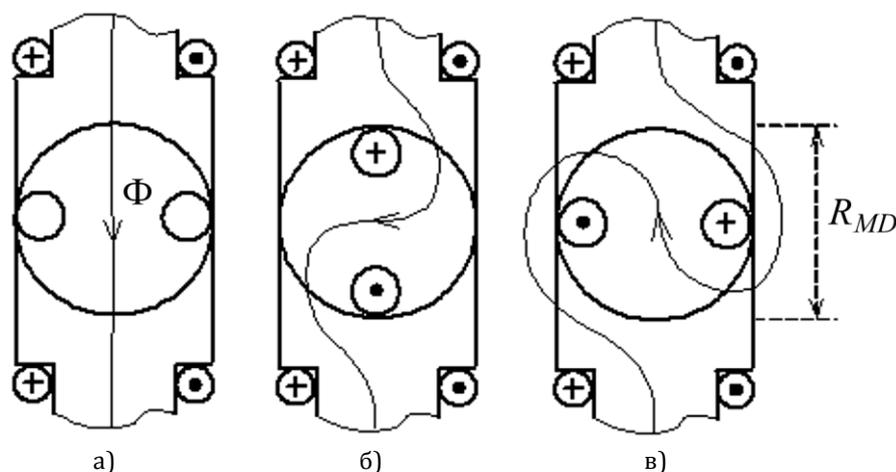


Рис. 2. Последовательность цикла работы электрической машины постоянного тока с постоянным потокосцеплением

Таким образом, с помощью физической модели рассмотрен процесс преобразования энергии от источника питания через магнитную энергию в работу электромагнитной силы для электромагнитных двигателей, работающих в режиме с постоянным потокосцеплением. Полученные результаты согласуются с опытными данными. Рассмотрены возможности повышения работы электромагнитной силы и мощности двигателя. Рассмотрены особенности таких машин. Исследования на физической модели необходимы для разработки последующих, более точных численных математических моделей. Результаты работы также могут быть использованы в учебных целях.

Список литературы

1. Запольских С. Н., Борисов А. А., Бобров А. С. Физические принципы преобразования энергий в электромагнитных системах с предварительным накоплением магнитной энергии // Advanced science, 2017. № 1. Физико-математические науки.
2. Запольских С. Н., Борисов А. А., Хлебов А. Г. Исследование энергетических характеристик электромагнитных систем с предварительным накоплением магнитной энергии на численных моделях // Advanced science, 2017. № 2. Физико-математические науки.
3. Патент РФ № 2560079. Электрический двигатель / С. Н. Запольских, А. А. Борисов. БИ, 2015. № 23.
4. Ряшенцев Н. П., Угаров Г. Г., Львицин А. В. Электромагнитные прессы. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 216 с.
5. Ряшенцев Н. П. Электромагнитный привод линейных машин / Н. П. Ряшенцев, А. Н. Ряшенцев. Новосибирск : Наука, 1985. 153 с.

Research and analysis of electromagnetic systems with constant flow coupling using a physical model

S. N. Zapolskyh

PhD of Technical Sciences, associate professor of the Department of engineering physics,
Vyatka State University. Russia, Kirov. ORCID: 0000-0001-5042-6403. E-mail: zapose8@yandex.ru

Abstract. The basic principles of operation of systems with inductive energy storage are considered, in which at first there is a preliminary accumulation of magnetic energy, and then its transformation into other types of energy with constant flow coupling, for such systems the design is simplified and energy indicators are increased. Currently, the element base and microprocessor technologies have reached a sufficiently high level to fully implement the practical application of this principle of energy conversion and conduct research on electromagnetic systems with constant flux coupling. We consider a physical model in which differential and integral equations describing physical processes occurring in systems with constant flow coupling are solved by analytical methods. The results obtained confirm the increase in energy characteristics. Such research on the physical model is necessary for the development of subsequent more accurate numerical mathematical models, and for the study of electromagnetic systems with constant flux coupling. The results of the work can also be used for educational purposes.

Keywords: electromechanical systems, modeling, magnetic energy storage, systems with constant flow coupling.

References

1. Zapol'skih S. N., Borisov A. A., Bobrov A. S. *Fizicheskie principy preobrazovaniya energij v elektromagnitnyh sistemah s predvaritel'nym nakopleniem magnitnoj energii* [Physical principles of energy conversion in electromagnetic systems with preliminary accumulation of magnetic energy] // Advanced science. 2017. No. 1. Physical and Mathematical Sciences.
2. Zapol'skih S. N., Borisov A. A., Hlebov A. G. *Issledovanie energeticheskikh harakteristik elektromagnitnyh sistem s predvaritel'nym nakopleniem magnitnoj energii na chislennyh modelyah* [Investigation of energy characteristics of electromagnetic systems with preliminary accumulation of magnetic energy on numerical models] // Advanced science. 2017. No. 2. Physical and Mathematical Sciences.
3. Patent of RF no. 2560079. Electric motor / S. N. Zapol'skih, A. A. Borisov. BI, 2015, No. 23. (in Russ.)
4. Ryashencev N. P., Ugarov G. G., L'vicin A. V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk. Nauka, Sib. dep. 1989. 216 p.
5. Ryashencev N. P. *Elektromagnitnyj privod linejnyh mashin* [Electromagnetic drive of linear machines] / N. P. Ryashencev, A. N. Ryashencev. Novosibirsk. Nauka. 1985. 153 p.

Численное моделирование ударно-волнового течения в нейтральной и электрически заряженной газозвесе*

Д. А. Тукмаков

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института механики и машиностроения, Казанский научный центр Российской академии наук.
Россия, г. Казань. E-mail: tukmakovDA@imm.knc.ru

Аннотация. Данная работа посвящена численному моделированию ударно-волновых течений многофазных сред. В статье на основе численного решения уравнений динамики газозвеси проводится моделирование процесса ударно-волнового истечения неоднородной среды в однородный газ с учетом сил электрической природы, воздействующих на дисперсную составляющую, а также силового и теплового взаимодействия компонент смеси. Несущая среда описывается как вязкий сжимаемый теплопроводный газ. При учете межкомпонентного взаимодействия несущей и дисперсной компонент смеси в моделируемой многофазной среде учитывались сила Стокса, динамическая сила Архимеда и сила присоединенных масс. Уравнения математической модели дополнялись замыкающими соотношениями и граничными условиями. Система уравнений динамики газозвеси решалась с помощью явного конечно-разностного метода Мак-Кормака. Для получения монотонного численного решения применялась схема нелинейной коррекции сеточной функции.

Ключевые слова: численное моделирование, многофазные среды, ударные волны, уравнение Навье-Стокса, электрогидродинамика.

Многие природные явления и процессы связаны с движением сплошных сред, неоднородных по своим механическим и физико-химическим свойствам [7; 10; 16; 18]. В ряде случаев экспериментальное исследование динамических процессов в неоднородных средах затруднено, в связи с чем требуется создание математических моделей таких течений [7]. В частности, интерес к математическому моделированию динамики газозвесей вызван задачами, связанными с оптимизацией установок транспортировки дисперсных сред, оптимизацией технологий экранирования промышленных взрывов запыленными средами и исследованием ударно-волновых течений многофазных сред в реактивных двигателях детонационного типа, оптимизацией технологий нанесения порошковых покрытий в электрическом поле [1-5]. Течения гетерогенных смесей, в которых массовые доли компонент имеют сопоставимые величины, во многом определяются эффектами, вызванными межфазным взаимодействием [10], что существенно отличает такого рода течения от динамики однородных сред [11]. Совершенствование технологий напыления порошковых покрытий в электрическом поле требует создания математических моделей, учитывающих воздействие на гетерогенную смесь сил, имеющих как аэродинамическую, так и электромагнитную природу [1; 4; 5; 14]. В процессе такого напыления происходит истечение запыленной среды в высокоскоростном потоке из распыляющего канала с последующим столкновением потока заряженной запыленной среды с твердой поверхностью [1].

В данной работе моделируется течение среды, представляющей собой электрически заряженную газозвесь монодисперсного состава. Предполагается, что все включения дисперсной фазы имеют одинаковый размер и состав, при этом со стороны несущей среды частицы находятся под действием силы аэродинамического сопротивления, силы Архимеда, силы присоединенных масс. Учитывается также сила тяжести и сила Кулона, действующая со стороны электрического поля, которое создано распределенным зарядом газозвеси. Для описания ее движения применяется система уравнений динамики многоскоростной и многотемпературной газозвеси со скоростным и температурным скольжением фаз. Математическая модель включает в себя уравнения движения несущей среды и дисперсной фазы. Одним из наиболее важных параметров дисперсной компоненты неоднородной смеси является средняя плотность, представляющая собой произведение объемного содержания дисперсной компоненты на физическую плотность материала дисперсной фазы. Физическая плотность материала дисперсных включений в процессе течения многофазной среды не изменяется. При этом объемное содержание является функцией временной и пространственных переменных.

Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье-Стокса для сжимаемого теплопроводного газа с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена [7; 10; 13; 14; 15]:

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №19-01-00442.

© Тукмаков Д. А., 2019

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial x} &= 0, \\
\frac{\partial(\rho_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 u_1^2 + p - \tau) &= -F + \alpha \frac{\partial p}{\partial x}, \\
\frac{\partial(e_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left([e_1 + p - \tau] u_1 + \lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) &= Q - |F|(u_1 - u_2) + \alpha \frac{\partial(pu)}{\partial x}, \\
\tau &= \frac{4}{3} \mu \frac{\partial u}{\partial x}.
\end{aligned} \tag{1}$$

Динамика дисперсной фазы описывается уравнением сохранения средней плотности, уравнениями сохранения составляющих импульса и уравнением сохранения тепловой энергии, записанными с учетом теплообмена, обмена импульсом с несущей фазой и с учетом силы Кулона, действующей на частицы дисперсной фазы [12]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial x} &= 0, \\
\frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 u_2^2) &= F - \alpha \frac{\partial p}{\partial x}, \\
\frac{\partial(e_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(e_2 u_2) &= -Q, \\
\rho_2 &= \alpha_2 \rho_{20}, \\
\frac{d\varphi}{dx^2} &= \rho_2 q, \\
F &= \frac{3\alpha}{(8r)} C_d \rho_1 |u_1 - u_2| (u_1 - u_2) + \alpha \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right) + \\
&+ 0.5 \alpha \rho_2 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial t} - u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) - q_0 \rho_2 d\varphi/dx, \\
C_d &= \frac{24}{Re_{21}} + \frac{4}{Re_{21}^{0.5}} + 0.4,
\end{aligned} \tag{2}$$

$$M_{21} = |\bar{V}_1 - \bar{V}_2| / c, \quad Re_{21} = \rho_1 |\bar{V}_1 - \bar{V}_2| 2r / \mu, \quad Pr = \gamma C_p \mu / \lambda$$

Здесь p, ρ_1, u_1 – давление, плотность, декартовы составляющие скорость несущей среды; T_1, e_1 – температура и полная энергия газа; ρ_2, T_2, e_2, u_2 – средняя плотность, температура, внутренняя энергия, скорость дисперсной фазы. Температура несущей среды находится из уравнения $T_1 = (\gamma - 1)(e_1/\rho_1 - 0.5(u_1^2))/R$, где R – газовая постоянная несущей фазы. Внутренняя энергия взвешенной в газе дисперсной фазы определяется как $e_2 = \rho_2 C_p T_2$, где C_p – удельная теплоемкость единицы массы вещества дисперсной фазы. В уравнение энергии для несущей фазы входит коэффициент теплопроводности газа, коэффициент теплообмена α^T на поверхности частица – несущая среда и тепловой поток за счет теплообмена между газом и частицей:

$$Q_2 = \alpha^T 4\pi r^2 (T_1 - T_2) n \tag{3}$$

здесь n – концентрация частиц.

На границах расчетной области задавались граничные условия Дирихле для составляющих скорости несущей и дисперсной фазы и граничные условия Неймана для остальных функций [7; 17].

Составляющие силы Кулона на единицу объема газозвеси определяются через ее удельный заряд, объемную плотность твердой фазы и напряженность электрического поля. Потенциал электрического поля в расчетной области определяется из решения уравнения Пуассона с граничными

условиями Дирихле [12; 15]. В правой части уравнения Пуассона содержится плотность заряда газозвеси, отнесенная к абсолютной диэлектрической проницаемости несущей среды [12]:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho_{\text{эл}}}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad \Delta^2 \varphi = -\frac{\rho_{\text{эл}}}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad \rho_{\text{эл}} = \rho_1 \cdot q, \quad \varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \Phi / \text{м}. \quad (4)$$

где q_0 – удельный заряд единицы массы твердой фракции, φ – потенциал электрического поля. Система уравнений движения двухфазной смеси (1)-(2) в матричном виде выглядит как:

$$\mathbf{q}_t + \mathbf{E}_x = \mathbf{H}; \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_1 u_1 \\ \rho_2 u_2 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \rho_1 u_1 \\ \rho_2 u_2 \\ \rho_1 u_1^2 + p - \tau \\ \rho_2 u_2^2 \\ (e_1 + p_1 - \tau)u_1 + \lambda \partial T_1 / \partial x \\ e_2 u_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F + \alpha \partial p / \partial x \\ F - \alpha \partial p_1 / \partial x \\ -Q_2 - |F|(u_1 - u_2) + \alpha \partial (p_1 u_1) / \partial x \\ Q_2 \end{bmatrix}.$$

Явная схема Мак-Кормака [17] для системы уравнений (5) включает в себя последовательно выполняемые шаги предиктор (6) и корректор (7):

$$\mathbf{q}_j^* = \mathbf{q}_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{E}_{j+1}^n - \mathbf{E}_j^n) + \Delta t \mathbf{H}_j^n, \quad (6)$$

$$\mathbf{q}_j^{n+1} = 0,5(\mathbf{q}_j^n + \mathbf{q}_j^*) - 0,5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{E}_j^n - \mathbf{E}_{j-1}^n) + 0,5 \Delta t \mathbf{H}_j^n. \quad (7)$$

Монотонность решения достигалась с помощью применения схемы коррекции [8] после перехода на новый временной слой при $t = t^{n+1}$. Алгоритм коррекции выполнялся последовательно вдоль координаты x , а затем вдоль координаты y в расчетной области для функции Z – одной из координат вектора $\mathbf{q} = (\rho_1, u_1, e_1, \rho_2, u_2, e_2)^T$.

В случае если выполняются условия $(\delta Z_{j-1/2} \cdot \delta Z_{j+1/2}) < 0$ или $(\delta Z_{j+1/2} \cdot \delta Z_{j+3/2}) < 0$, то к функции Z в j -ом узле применяется алгоритм схемы коррекции:

$$\tilde{Z}_j = Z_j + k(\delta Z_{j+1/2} - \delta Z_{j-1/2}), \quad (8)$$

Нижний индекс обозначает номер узла сетки соответственно вдоль x или y . Здесь использованы обозначения:

$$\delta Z_{j-1/2} = Z_j - Z_{j-1}, \quad \delta Z_{j+1/2} = Z_{j+1} - Z_j, \quad \delta Z_{j+3/2} = Z_{j+2} - Z_{j+1}, \quad (9)$$

\tilde{Z}_j – значение функции после перехода на $(n+1)$ -ый временной слой по схеме Мак-Кормака, k – коэффициент коррекции.

Уравнение Пуассона для потенциала электрического поля (4) решалось методом конечных разностей с помощью итерационной схемы метода установления [6] на газодинамической расчетной сетке.

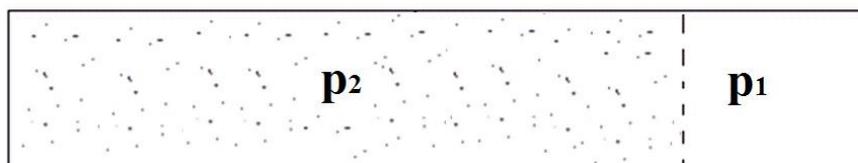
Численная модель неравновесной динамики газозвеси, основанная на решении системы уравнений движения гетерогенной смеси явным конечно-разностным методом Мак-Кормака [17] с применением схемы коррекции численного решения [8], была протестирована сопоставлением результатов расчетов движения ударных волн по запыленным средам с известным из литературы численным решением, полученным методом крупных частиц [7; 3].

В статье [10] проведено сопоставление численных расчетов, полученных на основе программного кода, реализующего численный алгоритм решения системы уравнений динамики монодисперсной газозвеси с результатами физического эксперимента по разлету сжатого объема газозвеси в чистый газ [2], которое показало приемлемое соответствие экспериментальных данных и численных расчетов.

В приведенных ниже расчетах объемное содержание дисперсной фазы газозвеси составляло $\alpha = 0.0005$. Физическая плотность и теплоемкость вещества твердых включений: $\rho_{20} = 1848 \text{ кг/м}^3$ и $C_{v2} = 1824 \text{ Дж/(кг*К)}$ соответственно, что аналогично плотности и теплоемкости бериллия. Удельный массовый заряд дисперсной фазы $q = -0.001 \text{ Кл/кг}$ [1].

На рис. 1 приведено изображение расчетной области, состоящей из камеры высокого давления, заполненной сжатой газозвесью и камеры низкого давления, содержащей чистый газ. На рис. 2а, 2б изображены распределения давления и температуры газа при распаде разрыва в однородной среде и при разлете сжатого объема газозвеси в чистый газ. Из рисунка следует, что в процессе разлета сжатого объема газозвеси давление и температура в волне сжатия меньше, чем в чистом газе. Таким образом, присутствие межфазного силового взаимодействия и теплообмена между дисперсной и газовой фазами снижают скорость движения возмущения и температуру на переднем крае волны сжатия по сравнению с распадом разрыва в чистом газе.

На рис. 3 представлены пространственные распределения «средней плотности» дисперсной фазы и давления газа в различные моменты времени. Процесс переноса дисперсной фазы в камеру низкого давления является более длительным по сравнению с движением возмущения давления в газовой компоненте смеси. Массоперенос твердых частиц спутным потоком газа в камеру низкого давления находится на начальной стадии, в то время как ударная волна, отразившись от твердой поверхности, движется в обратном направлении – рис. 3б.



$$p_2 > p_1 \quad q = -0.001 \text{ Кл/кг}$$

Рис. 1. Схематичное изображение ударной трубы

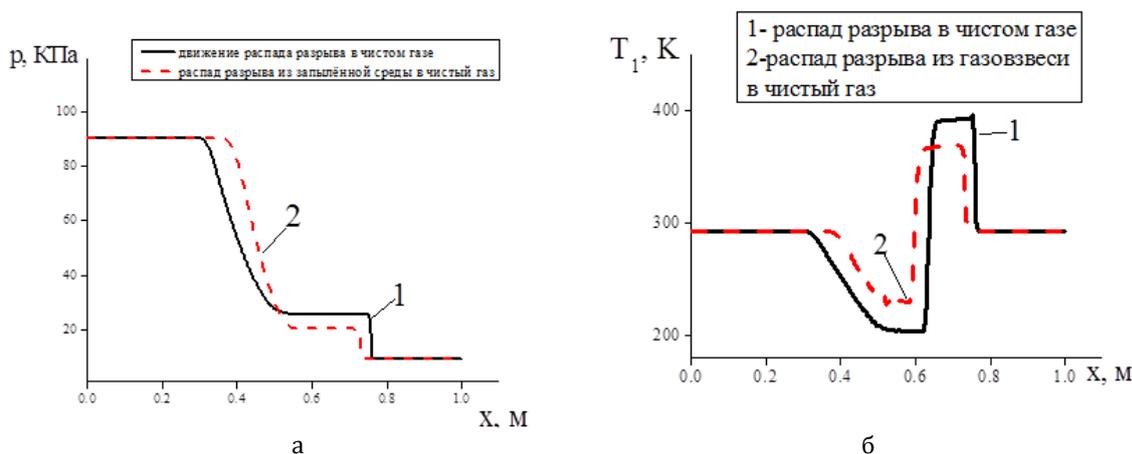


Рис. 2. Распределение давления – рис. 2а и температуры газа – рис. 2б при распаде разрыва в чистом газе и при разлете сжатого объема газозвеси в чистый газ

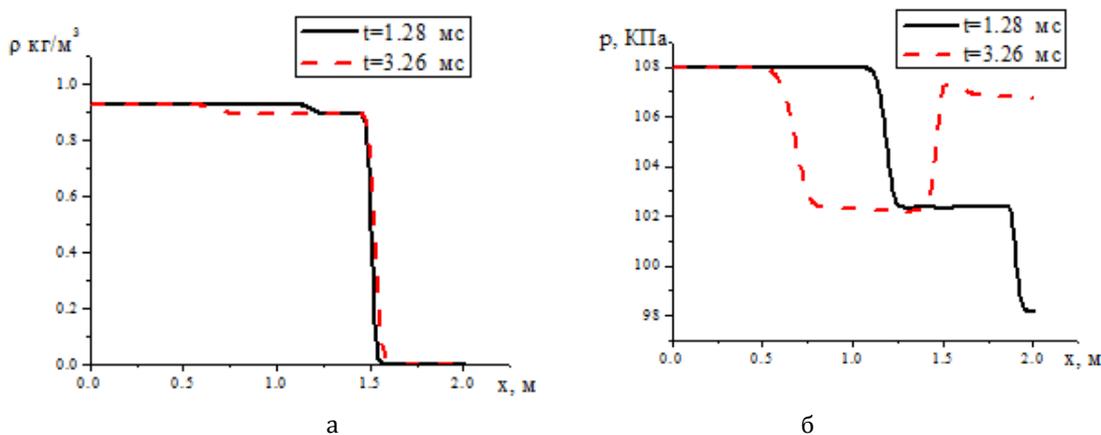


Рис. 3. Пространственное распределение «средней плотности» дисперсной фазы и давления газа в различные моменты времени

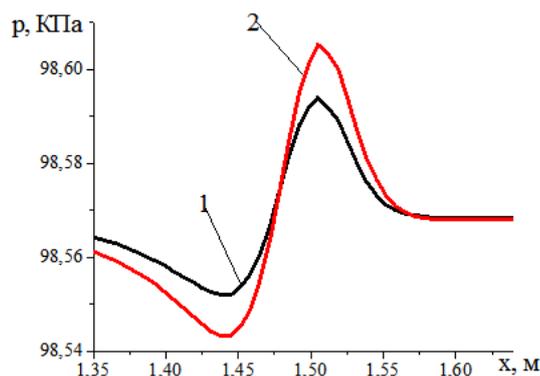


Рис. 4. Возмущение давления формируемое электрически заряженной дисперсной фазой с размерами дисперсных включений $d = 2$ мкм (кривая 1) и $d = 4$ мкм (кривая 2). Момент времени $t = 1.4$ мс. Начальная интенсивность разрыва $p_2/p_1 = 1.01$

При заполнении емкости электрически заряженными частицами пыли, имеющими заряд одинакового знака, частицы под действием силы Кулона приходят в движение и за счет межкомпонентного взаимодействия формируют акустическое возмущение в газе [13].

На рис. 4 приложено распределение давления при формировании акустического возмущения движением дисперсной фазы частицы, которой имеют заряд одинакового знака, расчеты проведены для двух размеров частиц.

Из рисунка следует, что в процессе формирования возмущения давления образуется как волна сжатия, так и волна разряжения газа. Численное исследование процесса формирования акустического возмущения заряженными частицами показывает, что интенсивность возмущения давления уменьшается с ростом размера частиц дисперсной фазы (рис. 4). Закономерность можно объяснить тем, что уменьшение размера частиц приводит к увеличению площади соприкосновения несущей среды и дисперсной фазы и, как следствие, интенсификацией межфазного взаимодействия. Так как в данной математической модели частицы имеют сферическую форму, то при уменьшении размера частиц на один порядок площадь одной частицы уменьшается на два порядка, а количество частиц возрастает на три порядка, таким образом, при уменьшении размера частиц площадь межфазного взаимодействия возрастает на порядок.

Рассмотрим влияние эклектического заряда дисперсных частиц на движение ударной волны из запыленной среды в чистый газ. Рис. 5 отображает результаты численных расчетов скорости газа при распространении ударной волны из запыленной среды в чистый газ. В электрически заряженной запыленной среде наблюдается большая скорость спутного потока газа в волне разряжения (рис. 5), что является следствием более низкого давления в волне разряжения.

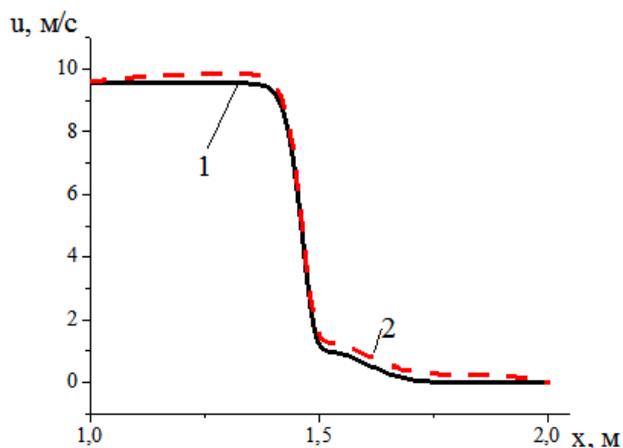


Рис. 5. Пространственное распределение скорости несущей среды газозвеси при ударно-волновом истечении нейтральной газозвеси – кривая 1 и электрически заряженной газозвеси – кривая 2. Для интенсивности разрыва $p_2/p_1 = 1.1$

В расчетах распространения ударной волны из чистого газа и из запыленной среды было выявлено, что наличие дисперсной фазы приводит к уменьшению скорости, температуры и давления в ударной волне.

Также в результате численного моделирования выявлены отличия процессов распространения ударной волны из запыленной среды в чистый газ в случаях электрически нейтральной и заряженной газозвесей.

Список литературы

1. Гаврилова В. А., Кашапов Н. Ф., Фазльяхматов М. Г. Нанесение защитного полимерно-порошкового покрытия на многоэлементный медицинский пьезоэлектрический датчик в поле коронного разряда // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 3-3. С. 114–118.
2. Ударные волны при разлете сжатого объема газозвеси твердых частиц / Б. Е. Гельфанд [и др.] // ДАН СССР. 1985. Т. 281. № 5. С. 1113–1116.
3. Губайдуллин Д. А., Тукмаков Д. А. Численное исследование эволюции ударной волны в газозвеси с учетом неравномерного распределения частиц // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 10. С. 109–119.
4. Дикалюк А. С., Суржиков С. Т. Численное моделирование разреженной пылевой плазмы в нормальном тлеющем разряде // Теплофизика высоких температур, 2012. Т. 50. № 5. С. 611–619.
5. Зинченко С. П., Толмачев Г. Н. О накоплении продуктов распыления сегнетоэлектрической мишени в плазме тлеющего высокочастотного разряда // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 53–56.
6. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырский П. И. Вычислительные методы. Т. 2. М.: Наука, 1977. 401 с.
7. Кутушев А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра, 2003, 284 с.
8. Музафаров И. Ф., Утюжников С. В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа // Математическое моделирование, 1993. Т. 5. № 3. С. 74–83.
9. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. Наука, 1987. 464 с.
10. Нигматулин Р. И., Губайдуллин Д. А., Тукмаков Д. А. Ударно-волновой разлет газозвесей // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 418–421.
11. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с.
12. Сальянов Ф. А. Основы физики низкотемпературной плазмы, плазменных аппаратов и технологий. М.: Наука, 1997. 240 с.
13. Тукмаков А. Л., Тукмаков Д. А. Генерация акустического возмущения движущейся заряженной газозвесью // Инженерно-физический журнал. 2018. № 5. С. 1–7.
14. Тукмаков А. Л., Кашапов Н. Ф., Тукмаков Д. А., Фазльяхматов М. Г. Процесс осаждения заряженной полидисперсной газозвеси на поверхность пластины в электрическом поле // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. Вып. 4. С. 498–502.
15. Тукмаков Д. А. Математическая модель массопереноса и волновых процессов в плазме // Сборник тезисов, материалы 23-й Всероссийской науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-23, Екатеринбург). Екатеринбург: Изд-во АСФ России, 2017. С. 195–196.
16. Федоров А. В., Фомин В. М., Хмель Т. А. Волновые процессы в газозвесах частиц металлов. Новосибирск, 2015.
17. Fletcher C. A. Computation Techniques for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Berlin et al., 1988. 502 p.
18. Mamun A. A., Shukla P. K., Bingham R. Plasma voids (holes) in a dusty plasma // Physics Letters A. 2002. Т. 298. № 2-3. Pp. 179–184.

Numerical simulation of shock-wave flow in neutral and electrically charged gas suspensions

D. A. Tukmakov

PhD of Physical and Mathematical Sciences, researcher, Institute of mechanics and engineering – a structural subdivision of Federal Research Center KazSC RAS. Russia, Kazan. E-mail: tukmakovDA@imm.knc.ru

Abstract. This work is devoted to numerical modeling of shock-wave flows of multiphase media. In article on the basis of numerical solution of the dynamics equations over a cylinder is the simulation of shock-wave expiration of a heterogeneous medium in a homogeneous gas with the force of electric nature acting on the dispersed component, and power and thermal interaction of mixture components. The carrier medium is described as a viscous compressible heat-conducting gas. When taking into account the inter-component interaction of the carrier and dispersed components of the mixture in the simulated multiphase medium, the Stokes force, the dynamic force of Archimedes and the force of the attached masses were taken into account. The equations of the mathematical model were supplemented by closing relations and boundary conditions. The system of equations of gas suspension dynamics was solved using the explicit finite-difference method of McCormack. The scheme of nonlinear correction of the grid function was used to obtain a monotone numerical solution.

Keywords: numerical simulation, multiphase media, shock waves, Navier-Stokes equation, electrohydrodynamics.

References

1. Gavrilova V. A., Kashapov N. F., Fazlyjyahmatov M. G. Nanesenie zashchitnogo polimerno-poroshkovogo pokrytiya na mnogoelementnyj medicinskij p'ezoelektricheskij datchik v pole koronnogo razryada [Application of a protective polymer-powder coating to a multi-element medical piezoelectric sensor in the field of corona discharge] // *Izvestiya vysshevykh uchebnykh zavedenii. Physics.* – News of higher educational institutions. Physics. 2014. Vol. 57. No. 3-3. Pp. 114–118.
2. Gelfand B. E. Udarnye volny pri razlete szhatogo ob"ema gazovzvesi tverdyh chastic – Shock waves during the expansion of a compressed volume of gas suspension of solid particles // *DAN USSR.* 1985. Vol. 281. No. 5. Pp. 1113–1116.
3. Gubajdullin D. A., Tukmakov D. A. Chislennoe issledovanie evolyucii udarnoj volny v gazovzvesi s uchetom neravnomernogo raspredeleniya chastic [Numerical study of the evolution of a shock wave in a gas suspension taking into account the uneven distribution of particles] // *Matematicheskoe modelirovanie – Mathematical modeling.* 2014. Vol. 26. No. 10. Pp. 109–119.
4. Dikalyuk A. S., Surzhikov S. T. Chislennoe modelirovanie razrezhennoj pyl'evoy plazmy v normal'nom tleyushchem razryade [Numerical simulation of rarefied dust plasma in a normal glow discharge] // *Teplofizika vysokih temperature – High temperature thermophysics.* 2012. Vol. 50. No. 5. Pp. 611–619.
5. Zinchenko S. P., Tolmachev G. N. O nakoplenii produktov raspilyeniya segnetoelektricheskoy misheni v plazme tleyushchego vysokochastotnogo razryada [On accumulation of sputtering products of a ferroelectric target in a plasma of a smoldering high-frequency discharge] // *Prikladnaya fizika – Applied physics.* 2012. No. 5. Pp. 53–56.
6. Nigmatulin R. I. Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media. Part 1]. Nauka. 1987. 464 p.
7. Krylov V. I., Bobkov V. V., Monastyrynj P. I. Vychislitel'nye metody [Computational methods]. Vol. 2. M. Nauka. 1977. 401 p.
8. Kutushev A. G. Matematicheskoe modelirovanie volnovykh processov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh [Mathematical modeling of wave processes in aerodisperse and powdery media]. SPb. Nedra. 2003. 284 p.
9. Muzafarov I. F., Utyuzhnikov S. V. Primenenie kompaktnykh raznostnykh skhem k issledovaniyu nestacionarnykh techenij szhimaemogo gaza [Application of compact difference schemes to the study of non-stationary flows of compressible gas] // *Matematicheskoe modelirovanie – Mathematical modeling.* 1993. Vol. 5. No. 3. Pp. 74–83.
10. Nigmatulin R. I., Gubajdullin D. A., Tukmakov D. A. Udarno-volnovoj razlet gazovzvesej [Shock-wave dispersion of gas suspensions] // *Doklady akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences.* 2016. Vol. 466. No. 4. Pp. 418–421.
11. Ovsyannikov L. V. Lekcii po osnovam gazovoj dinamiki [Lectures on the basics of gas dynamics]. Moscow ; Izhevsk. Institute of computer research. 2003. 336 p.
12. Sal'yanov F. A. Osnovy fiziki nizkotemperaturnoj plazmy, plazmennyyh apparatov i tekhnologij [Fundamentals of low-temperature plasma physics, plasma devices and technologies]. M. Nauka. 1997. 240 p.
13. Tukmakov A. L., Kashapov N. F., Tukmakov D. A., Fazlyjyahmatov M. G. Process osazhdeniya zaryazhennoj polidispersnoj gazovzvesi na poverhnost' plastiny v elektricheskom pole [Process of sedimentation of a polydisperse suspension of a charged surface in an electric field] // *Teplofizika vysokih temperatur – Thermal physics of high temperatures.* 2018. Vol. 56. Is. 4. Pp. 498–502.
14. Tukmakov A. L., Tukmakov D. A. Generaciya akusticheskogo vozmushcheniya dvizhushchejsya zaryazhennoj gazovzves'yu [Generation of acoustic perturbation of a moving charged gas suspension] // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Engineering and physics journal.* 2018. No. 5. Pp. 1–7.
15. Tukmakov D. A. Matematicheskaya model' massoperenosa i volnovykh processov v plazme [Mathematical model of mass transfer and wave processes in plasma] // *Sbornik tezisov, materialy 23-j Vserossijskoj nauch. konf. studentov-fizikov i molodyh uchenykh (VNKSF-23, Ekaterinburg)* – Collection of theses, materials of the 23rd all-Russian scientific conference of students in physics and young scientists (VNKSF-23, Yekaterinburg). Yekaterinburg. ASF of Russia. 2017. Pp. 195–196.
16. Fedorov A. V., Fomin V. M., Hmel' T. A. Volnovye processy v gazovzvesyah chastic metallov [Wave processes in gas suspensions of metal particles]. Novosibirsk. 2015.
17. Mamun A. A., Shukla P. K., Bingham R. Plasma voids (holes) in a dusty plasma // *Physics Letters A.* 2002. T. 298. No. 2-3. Pp. 179–184.
18. Fletcher C. A. Computation Techniques for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Berlin et al., 1988. 502 p.

Результаты деятельности научно-исследовательской лаборатории функциональной электроники ВятГУ

В. И. Жаворонков¹, С. И. Жаворонков², А. С. Ситяков³

¹кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, профессор, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: vzhavoronkov@mail.ru

²научный сотрудник лаборатории функциональной электроники, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров

³ведущий специалист лаборатории функциональной электроники, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров

Аннотация. Статья посвящена научно-исследовательской работе, которая выполнялась на экспериментальной базе научной лаборатории функциональной электроники (НИЛ ФЭ) КГПИ (ВГПУ, ВятГГУ, ВятГУ). Деятельность лаборатории охватывает период 50 лет. Лаборатория имела совместные исследования с рядом высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов России. Обозначена тематика лаборатории и основные этапы научной деятельности, отмечен существенный вклад в научные разработки сотрудников лаборатории С. И. Жаворонкова и А. С. Ситякова. Представлена научно-педагогическая работа со студентами физического и химического факультетов по выполнению курсовых и дипломных работ. Достижением кафедры физики и НИЛ ФЭ является поступление ряда выпускников ВятГГУ в аспирантуру МПГУ. Важным этапом деятельности НИЛ функциональной электроники было тесное сотрудничество с НИЛ нанохимии и нанотехнологии ВятГГУ.

Ключевые слова: электрон, скоростное осциллографирование, однократные сигналы нано- и пикосекундной длительности, полупроводниковые СВЧ-приборы, сверхпроводимость, электронно-оптическая регистрация, слабосветящиеся процессы, люминесценция, фотон, корпускулярно-волновой дуализм излучения, квантовая оптика, биофизика, нанотехнология.

Научно-исследовательская лаборатория функциональной электроники была создана на базе физического факультета Кировского государственного педагогического университета в 1971 году В. И. Жаворонковым, кандидатом физико-математических наук по специальности «Радиофизика и квантовая электроника» [8]. К этому времени Владимир Иванович уже имел значительный опыт физика-экспериментатора. Еще во время учебы в Ленинградском университете совместно с техником-механиком была смонтирована установка по регистрации однократных быстропротекающих процессов с экрана скоростного осциллографа СВЧ-диапазона. Прибор усиливал яркость практически невидимых глазом изображений на экране. В результате удалось «зацепить» слабосветящийся короткий однократный импульс с экрана осциллографа, зафиксировать его и получить фотоосциллограмму, которую можно исследовать – измерять амплитуду колебаний, длительность, время нарастания и т. д. Осциллограф приобрел новое качество, стало возможным использовать его в нано- и субнаносекундном диапазоне длительности [9]. За три года напряженных исследований в аспирантуре был смонтирован уникальный осциллограф и с его помощью исследованы физические процессы, протекающие в полупроводниковых СВЧ-приборах. Зарегистрированный однократный импульс имел передний фронт длительностью $\tau_{п.ф.} \approx 0,5$ нс при скорости записи порядка $\sim 8 \cdot 10^7$ м/с [8]. Прибор открыл новые возможности для развития и применения полупроводниковой электроники СВЧ [8; 10].

В становлении лаборатории функциональной электроники принимали участие специалисты и научные сотрудники радиофизической лаборатории Московского государственного педагогического института (в дальнейшем МПГУ, г. Москва), Глазовского государственного педагогического института и филиала Ижевского государственного технического университета (г. Глазов), НИИ промышленной и морской медицины (г. Санкт-Петербург). Они помогали в оснащении материально-технической базы лаборатории и финансировании научных разработок.

В дальнейшем финансирование научной лаборатории осуществлялось в основном за счет выполнения хозяйственных работ. Разработки лаборатории внедрялись в МПГУ, ГГПИ, филиал ИжГТУ, в лаборатории атмосферного электричества Тартуского госуниверситета (Эстония), Высокотемпературном геофизическом институте (г. Нальчик, Кабардино-Балкарская республика), НИИ МАШ (г. Дзержинск Горьковская обл.), НИИ ПММ (г. Санкт-Петербург), лаборатории физической механики НИИ математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета.

Тематика исследований лаборатории функциональной электроники охватывала широкую область экспериментальной физики, радиофизики и квантовой электроники. Научные интересы руководителя лаборатории В. И. Жаворонкова, как исследователя квантовых эффектов, привлекали, в первую очередь, пограничные области знания и практики, в которых ранее даже не предполагалась или недооценивалась значимость проявления квантовой природы на общем фоне сложившихся представлений о казавшихся исчерпывающими описаниях физических механизмов проявления на неклассическом языке.

Ранее не была разработана и соответствующая методология исследований, вероятно, прежде всего из-за того, что результаты исследований в этих областях, получаемые с помощью существующих к тому времени химических, биологических, да и биофизических методик, включая оптику, представлялись адекватными по поставленным целям и полноте.

Основными направлениями деятельности НИЛ функциональной электроники стали:

1) осциллографирование однократных быстропротекающих процессов нано- и пикосекундной длительности при уровне сигнала менее 1 Вольта. Это позволило исследовать генерацию колебаний в диодах Ганна с частотой колебаний 3 ГГц и более [8];

2) применение электронно-оптических методов регистрации и изучения слабосветящихся биологических объектов, химических реакций, нанообъектов, акустических процессов, результатов антропогенного воздействия на состояние биологических систем в экологических исследованиях [6; 7];

3) применение электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и усилителей яркости оптического изображения в учебном физическом эксперименте; разработка новых лекционных демонстраций и лабораторных работ по оптике и квантовой физике с применением ЭОП и видеотехники [13; 18];

4) разработка высокочувствительных электронно-оптических методов изучения функционального состояния клеток крови и применение их в клинической практике [6].

В последнее время НИЛ функциональной электроники ВятГУ стала проводить исследования явления сонолюминесценции, которое сейчас привлекает к себе внимание физиков в связи с совершенной неясностью самого механизма возникновения вспышек света, а также с возможностью научного прорыва в проблеме генерации излучения в пузырьке пара внутри жидкости. Решение этой проблемы позволит разработать новые подходы к вопросам получения энергии.

Лаборатория осуществляла научно-техническое сотрудничество со следующими вузами и институтами: Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины (г. Санкт-Петербург), Институт нефте-химического синтеза РАН (г. Москва), МПГУ, кафедра общей и экспериментальной физики (г. Москва), Кировский государственный медицинский университет, кафедра физики и медицинской информатики (г. Киров), Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН, лаборатория криофизиологии крови (г. Сыктывкар), НИИ гематологии и переливания крови (г. Киров), ВятГУ (г. Киров) и др.

После многочисленных экспериментов с помощью сотрудников лаборатории (С. И. Жаворонков, А. С. Ситяков) была создана серия электронных приборов, позволяющих увидеть и исследовать недоступное человеческому глазу [4; 7; 12]. Высокочувствительный электронно-оптический прибор (индикатор) для регистрации сверхслабых излучений биологических объектов нашел широкое применение в научно-исследовательской практике, в решении вопросов прикладной физики, кавитационной нанотехнологии и медицины. Совместно с учеными Всесоюзного научно-исследовательского института оптико-физических измерений и института прикладной физики (г. Москва) удалось довести спектральную чувствительность до предельного уровня, который позволял регистрировать единичные фотоны входного излучения. Прибор стал востребован в научно-исследовательских институтах разных профилей [1; 6; 21].

В 1998 г. руководитель лаборатории В. И. Жаворонков защитил докторскую диссертацию по теме «Специализированные высокочувствительные оптико-электронные информационно-измерительные устройства и системы для исследования однократных быстропротекающих и слабосветящихся процессов в экспериментальной физике» [17] и стал первым доктором технических наук в истории педагогического вуза по специальности «Информационно-измерительные системы».

Соратники

В создании, разработке и монтаже установок нужен был высококвалифицированный физик-механик и его понимание того, что он монтирует и для чего. **Первый помощник** в реализации научных идей В. И. Жаворонкова – его брат **Сергей Иванович Жаворонков**. Вдумчивый, разносторонний исследователь, великолепный экспериментатор, обладающий энциклопедическими знаниями. Он получил высшее образование по специальности «Радиофизика» в Московском физико-техническом институте (г. Долгопрудный Московской обл.) и Горьковском государственном универси-

тете им. Н. И. Лобачевского (1962–1967). **С 1974 по 2017 г. был научным сотрудником НИЛ функциональной электроники, выполняя работы по хоздоговорным темам.**

Еще в 1970-х гг. в лаборатории была разработана группа приборов на основе электронно-оптических преобразователей для регистрации слабого свечения объектов и однократных импульсов наносекундной длительности, наблюдаемых на экране осциллографов [10; 21].

За разработку и создание высокочувствительного электронно-оптического индикатора для научных исследований Сергей Иванович был награжден серебряной медалью ВДНХ СССР и значком Федерации радиоспорта СССР «Мастер-радиоконструктор» (1977 г.).

Сергеем Ивановичем была также разработана и изготовлена установка для изучения квантовых флуктуаций сверхслабых оптических излучений (2007 г.). Она позволяет экспериментально подтвердить корпускулярно-волновую природу света. Удалось зарегистрировать границу перехода волновой оптики в квантовую оптику [19].

Сергей Иванович разработал и создал установку для исследования и применения явления кавитации [12]. Он является соавтором патента на полезную модель «Магнитоотрицательный излучатель» (2015 г.).

Созданное Сергеем Ивановичем современное экспериментальное оборудование позволяет исследовать сверхслабое свечение, сопровождающее химические и биохимические процессы.

В 2016 г. вышло учебное издание С. И. Жаворонкова «Методические указания для проведения лабораторных работ по курсу “Применение ЭОП в физическом эксперименте”» [18].

Спецпрактикум содержит описание системы из 6 серий экспериментов, основанных на применении электронной оптики. В практикуме приводятся 23 оригинальных варианта известных экспериментов по оптике, квантовой и атомной физике, люминесценции для использований в учебном физическом эксперименте вуза.

В зависимости от требований программы применение технических средств электронной оптики позволяет поставить новые учебные физические эксперименты для использования в курсе преподавания общей физики вуза.

В частности, использование электронной оптики позволяет визуализировать некоторые физические и физико-химические процессы, что повышает привлекательность физического эксперимента для студентов. Особенно это важно при изучении быстропротекающих процессов, к которым, например, относится наблюдение развития электрического разряда в однородном или неоднородном электрическом поле. Это позволяет, в частности, лучше понять природу образования и существования плазмоедов типа шаровой молнии.

Результаты исследования были внедрены в учебный процесс кафедры общетехнических дисциплин Глазовского филиала Ижевского государственного технического университета.

Методические разработки докладывались на международных, всероссийских и региональных научно-методических конференциях: на 7-й всероссийской конференции «Учебный физический эксперимент: актуальные проблемы. Современные решения», г. Глазов, январь 2002 г.; на 7-й международной конференции стран Содружества «Современный физический практикум», проводившейся Министерством образования РФ и Ассоциацией кафедр физики технических вузов России под председательством академика РАН Ж. И. Алферова, г. С.-Петербург, 28–30 мая 2002 г. и других.

Афраим Сайфуллович Ситяков пришел в лабораторию функциональной электроники в 2008 г. после многолетней работы в лаборатории физики твердого тела. Научные интересы Афраима Сайфулловича на редкость разносторонние. Он ученый-физик, ученый-эколог и инженер-конструктор – автор целого ряда уникальных разработок по тематике лаборатории физики твердого тела, автор ряда уникальных конструкторских разработок для космической отрасли в сфере материаловедения, в области электронной оптики и дистанционного зондирования поверхности Земли, соавтор целого ряда книг и учебных пособий по экологии. Опубликовал свыше 100 научных работ. Он заслуженный работник Вятского государственного гуманитарного университета, удостоен звания «Отличник народного просвещения». За актуальные работы в области экологии он удостоен Премии Правительства Кировской области.

В лаборатории функциональной электроники он проводил серьезные разработки в области электронной оптики и кавитационной нанотехнологии [3]. Им разработана и изготовлена установка для звуковой и ультразвуковой кавитации в растворах, которая осуществляет регулирование размеров коллоидных частиц в растворе, диспергирование их до микро- и наноразмерного уровней.



*Научный сотрудник
лаборатории С. И. Жаворонков*

Проведено исследование воздействия кавитации на характеристики коллоидных систем, например, коллоидной фракции лечебной иловой грязи, изучались физические и химические процессы, вызываемые кавитацией [5].



*Ведущий специалист лаборатории
А. С. Ситяков*

Успешно работали студенты на базе лаборатории и по научному направлению «Физические методы экологических исследований». Например, было проведено интересное исследование по теме «Оценка шумовой и электромагнитной нагрузки на территории города Кирова», в котором участвовали студенты 3-го курса факультета информатики, математики и физики. Также студентами (П. И. Копанев, А. А. Рзаев, Д. Ю. Куклин, И. И. Заболотский) было проведено исследование «Оценка электромагнитного излучения во втором корпусе ВятГУ» (научные руководители – А. С. Ситяков, В. И. Жаворонков). Данная работа была представлена на конкурсе студенческих научных исследований 2012 года и отмечена грамотами.

В рамках Кировского областного фестиваля «АРХИМЕД – 2011» было представлено 8 технических проектов, в которых участвовало 14 студентов третьего курса факультетов ИМиФ и химического. Все студенты награждены сертификатами областного фестиваля технических проектов «АРХИМЕД – 2011». Руководителями научных проектов были профессор кафедры физики и методики обучения физике В. И. Жаворонков и ст. преподаватель той же кафедры А. С. Ситяков.

Научно-педагогическая деятельность

На экспериментальной базе лаборатории функциональной электроники Вятского государственного гуманитарного университета выполнялись курсовые и дипломные работы, проводились научные исследования студентов по тематике лаборатории.

В 1987 году В. И. Жаворонков был награжден золотой медалью ВДНХ «За подготовку студентов педвузов в организации научно-технического творчества». В 1988 году – серебряной медалью ВДНХ на выставке «Изобретательство и рационализация» за регистрирующее устройство к скоростному осциллографу [2]. Дипломами участника выставки отмечены исполнители данной разработки: С. И. Жаворонков, И. М. Юшков – старший преподаватель, А. И. Тырин – учебный мастер и Н. В. Губин – студент вуза.

Большое значение имела работа, которую провели В. И. Жаворонков, С. И. Жаворонков, врач-рентгенолог В. К. Вшивцев и студент-заочник физического факультета В. Ю. Зиборов. В результате был создан электронно-оптический прибор, позволяющий усиливать слабое свечение люминофорного экрана в несколько десятков раз. По задумке ученого он должен был передавать «картинку» на фотоприемник, а тот – на монитор телевизора или сразу в компьютер. Уже первые же эксперименты показали действенность методики. Во-первых, врач мог наблюдать «картинку» с рентген-аппарата на экране монитора, находясь за защитной стенкой. А во-вторых, для обследования пациента требовалось примерно в 10 раз меньшее излучение, чем при обычном «фотографировании».

Параллельно с основной разработкой ученые-практики создали простую, но оригинальную систему обработки и архивирования рентгеновских изображений. Владимир Зиборов написал компьютерную программу, создающую карточку к каждому рентгеновскому снимку с описанием истории болезни, данными о пациенте и рентгеновским снимком, скопированным миниатюрной видеокамерой прямо с негатоскопа.



Владимир Юрьевич Зиборов, Владимир Иванович Жаворонков и врач-рентгенолог Вячеслав Константинович Вшивцев за настройкой лечебного аппарата, 2006 г.

Установка для просмотра рентгеновских снимков и программа создания рентгенографической базы данных были запатентованы авторами в Федеральном институте промышленной собственности [11; 15].



*В. И. Жаворонков и М. В. Горшечников, аспирант ВятГГУ,
после защиты кандидатской диссертации, 2004 г.*

После окончания физического факультета М. В. Горшечников стал проводить исследования на экспериментальной базе научной лаборатории, опубликовал ряд статей, которые послужили основой для поступления в аспирантуру. Им было проведено результативное исследование по разработке и внедрению учебных установок на базе электронно-оптических преобразователей. Входящие в установки другие блоки и детали доступны в вузовских и школьных условиях. Разработанные автором варианты опытов позволяют существенно расширить возможности учебного физического эксперимента по разделам «Оптика», «Физика твердого тела», «Квантовая физика» при проведении лекционных демонстраций и организации практикумов. После окончания аспирантуры М. В. Горшечников защитил кандидатскую диссертацию по теме «Применение электронной оптики в учебном физическом эксперименте» по специальности «Методика преподавания физики» [14]. Ему присвоена ученая степень кандидата педагогических наук.

На базе лаборатории были проведены эксперименты и написана дипломные работы студентов физического факультета Ольги Фетищевой и Андрея Минина. Они решили опробовать на высокочувствительном приборе регистрацию сверхслабого излучения олеиновой кислоты. По интенсивности сверхслабого излучения этой и других органических кислот можно судить о качестве этих объектов. Фактически был разработан метод измерения энергетических характеристик биологических объектов и контроля за содержанием в них вредных веществ [19].

За участие в Национальной системе развития научной, творческой и инновационной деятельности молодежи России «ИНТЕГРАЦИЯ» четыре студента физического факультета ВятГГУ: А. С. Минин, О. В. Фетищева, а также А. С. Яцын, К. М. Гайсин – были награждены в 2007 г. дипломами и медалями.

В 2007 г. на базе лаборатории функциональной электроники студенты физического факультета А. А. Лобастова и Д. Ю. Исупов выполнили дипломные работы по применению инфракрасного излучения в учебном физическом эксперименте. Студенты были рекомендованы к поступлению в аспирантуру, и с 2008 г. они аспиранты кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ.

На протяжении многих лет между кафедрой общей физики КГПИ (ВГПУ, ВятГГУ) и кафедрой общей и экспериментальной физики Московского педагогического государственного университета (МПГУ) осуществлялось научно-техническое и методическое сотрудничество.

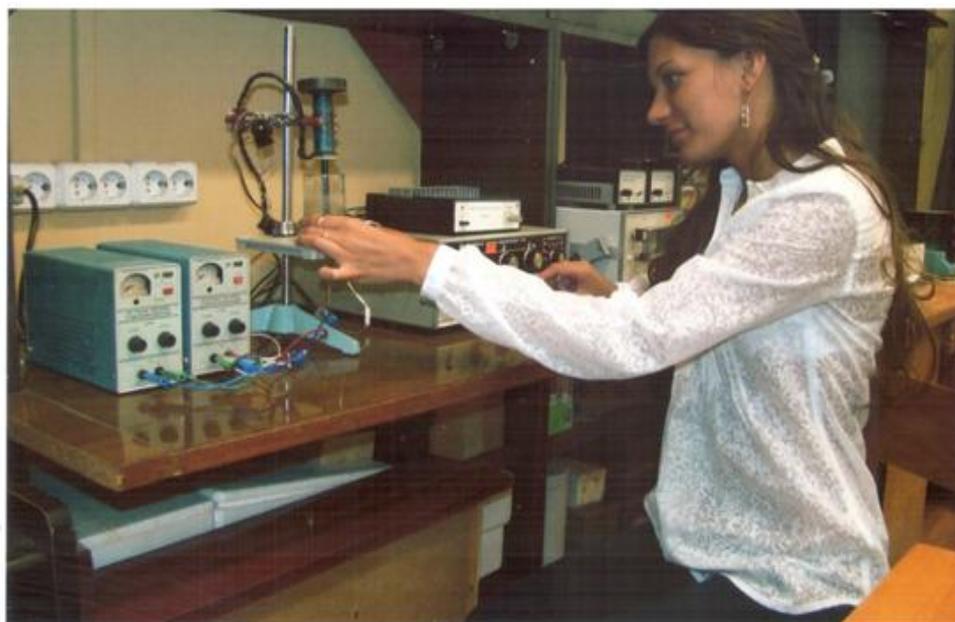
Работа сотрудников лаборатории функциональной электроники немало способствовала взаимовыгодному партнерству двух вузов. В рамках сотрудничества с МПГУ проводилась разработка новых лекционных демонстраций, лабораторных работ, методических рекомендаций, осуществлялось совершенствование подготовки студентов, аспирантов, повышение квалификации преподавателей и сотрудников [13].



В. И. Жаворонков и выпускники ВятГГУ (КГПИ) – аспиранты кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ: В. А. Селезнев, Р. В. Ожегов, И. В. Пентин, П. А. Ларионов, М. В. Елезов, Д. Ю. Исупов, А. А. Лобастова, А. С. Шураков. Юбилей радиофизической лаборатории, 2008 г.

Не менее эффективно выполнили свои дипломные эксперименты на базе лаборатории и студенты химического факультета.

В 2015 г. студентка 5-го курса М. А. Мошкова (в настоящее время аспирант КОЭФ МПГУ) выполнила исследование по дипломной работе «Влияние акустического воздействия на физико-химические характеристики коллоидных растворов», а студент В. В. Григорьев – по теме «Регулирование размера микро- и наночастиц GeO_2 в коллоидных растворах методом звуковой и ультразвуковой кавитации». Научно-техническую помощь студентам оказывал Афраим Сайфуллович Ситяков [5]. В 2016 г. студентка химического факультета В. Э. Владыкина проводила эксперименты по исследованию качества растительных масел на установке по регистрации сверхслабого свечения биологических объектов.



Студентка 5 курса химического факультета ВятГГУ М. А. Мошкова, 2015 г. Научные руководители: доц. Д. Н. Данилов и проф. В. И. Жаворонков. С 2016 г. М. А. Мошкова – аспирант КОЭФ МПГУ

История сотрудничества МПГУ и Вятского государственного педагогического университета представляет собой эталонный пример создания преемственности между университетским образованием и дальнейшей научной деятельностью молодых ученых [13].

В рамках научно-образовательного центра ВятГГУ на основе НИЛ функциональной электроники (НИЛ ФЭ) была организована исследовательская работа студентов в сфере нанотехнологий. Результаты проводимых исследований также обсуждались на различных региональных и республиканских конференциях и семинарах [3; 7].

Следует отметить тесное взаимодействие НИЛ функциональной электроники и НИЛ нанохимии и нанотехнологии ВятГГУ. Лаборатория функциональной электроники накопила огромный интеллектуальный потенциал по разработке и созданию высокочувствительных приемников оптического диапазона. Фотоприемники способны регистрировать единичные фотоны в диапазоне 200–1500 нм. Сочетание высокой чувствительности, разрешающей способности и быстродействия, позволяет успешно использовать предложенный метод для исследования широкого круга явлений в области биологии, химии и физической электроники. Фотоприемники позволяют измерять оптические характеристики (уровень излучения, размерность **фотон/(с*см²)**, спектральный состав излучения, пространственное и временное распределение) в реальном масштабе времени. Данный электронно-оптический метод регистрации и исследования объектов и структур в области нанотехнологий существенно дополняет современные микроскопические и спектральные методы и позволяет получить наиболее объективные и достоверные результаты изучаемых явлений и процессов. В результате сотрудниками лаборатории функциональной электроники получены интересные результаты по изучению био-хемилюминесценции цианобактерий [3; 7].

Результатом совместной работы явилось создание экспериментальной площадки для люминесцентных исследований на базе НИЛ нанохимии и нанотехнологии, публикация более 10 совместных работ, совместные выступления на конференциях различного уровня, участие с работами на Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи (Москва, ВВЦ, 2010 и 2011 годы), научная стажировка студентов химического факультета в МПГУ [7].

Представляется, что результаты работы лаборатории функциональной электроники, ее методология – багаж знаний, разработанных средств и оборудования, экспериментальных методик и анализа результатов – могут послужить базой для дальнейших исследований в области биофизики, медицины и фармакологии.

Основные экспериментальные результаты исследований НИЛ ФЭ

1. На скоростном СВЧ-осциллографе зарегистрирован передний фронт *импульсного сигнала* длительностью $\tau_{\text{нф}} = 0,5$ нс и амплитудой импульса менее $U_{\text{имп}} = 1$ В (размер по вертикали 4 см). При этом скорость нарастания переднего фронта импульса (скорость записи) была $v_z \approx 8 \cdot 10^7$ м/с. Это позволило проводить исследования однократных физических процессов в нано- и субнаносекундном диапазоне длительностей (1973 г.) [9].

2. С помощью метода автоэлектронной эмиссии (увеличение 10^6 раз) на экране проектора получено четкое электронное *изображение кристаллической решетки вольфрама с разрешением порядка 10 Å*. Автоэлектронное изображение решетки с экрана регистрировалось электронно-оптическим усилителем яркости (1982 г.) [21].

3. Проведены эксперименты по регистрации *аннигиляционных фотонов, возникающих при столкновении позитронов и электронов*. Предлагаемый анализатор позволяет улучшить метод измерения углового распределения аннигиляционных фотонов (1983 г.) [1].

4. Зарегистрированы и исследованы квантовые флуктуации фотонного излучения в оптическом диапазоне. В опыте по дифракции при малых уровнях освещенности наблюдались флуктуации изображений боковых максимумов (первого и второго) дифракционной картины. Таким образом, *зафиксирована квантовая структура наблюдаемой дифракционной картины* (1997 г.) [17; 18].

5. Совместно с сотрудниками ПРФЛ МПГУ [17] проведено *исследование динамики процесса воздействия однократного импульсного лазерного излучения и последующей релаксацией в сверхпроводниковой тонкой NbN пленке (нитрид ниобия)*. С экрана скоростного осциллографа С7-19 и ЭОП был зафиксирован фотоотклик на импульсное лазерное излучение длительностью $\tau_{\text{п}} \leq 20$ пс [17], а позднее измерены его временные параметры в нано-пикосекундном диапазоне (10^{-9} – 10^{-11})с.

6. **Впервые зарегистрирована фотолюминесценция листа герани** в инфракрасном диапазоне, как результат фотоотклика на короткое световое воздействие. Это экспериментальное *доказательство явления фотосинтеза* в растительном мире (2001 г.) [14].

7. Электронно-оптическим методом с помощью высокочувствительного фотоприемника на основе трехкамерного ЭОП зарегистрирован *мин. уровень излучения*, который составлял по статистике порядка 3-10 фотонов за секунду на квадратный сантиметр излучающей поверхности в ви-

димой области ($\lambda = 400$ нм., квантовый выход 0,1-0,3). Это позволило наблюдать флуктуации интенсивности формируемого изображения щели в сверхслабых световых потоках (2002 г.) [17, 20].

8. В 2016 году вышло учебное издание С. И. Жаворонкова «Специальный физический практикум». Автор впервые применил ЭОП и усилители яркости оптического изображения в учебном физическом эксперименте. В процессе выполнения лабораторных работ *доказана необходимость и доступность элементов электронной оптики и ее технических приложений студентами высших учебных заведений (2016 г.)* [16].

Юбилейная встреча, посвященная 80-летию кафедры общей и экспериментальной физики и 60-летию радиофизической лаборатории МПГУ (14 декабря 2018 г.)



Профессор ВятГУ В. И. Жаворонков и д. ф.-м. н., профессор РАН, зав. каф. теоретической физики МПГУ А. В. Наумов (выпускник КГПИ 1996 г.)

Литература о В. И. Жаворонкове

1. «Здесь я независим»: профессор Владимир Жаворонков о любимой науке / беседовала Елена Курбатова // Аргументы и факты. 2015. 14–20 янв. (№ 3). С. 3 : фот.
2. Борноволокнов Э. Сделано любителями : [об участии братьев В. и С. Жаворонковых в двадцать восьмой Всесоюзной выставке творчества радиолюбителей-конструкторов ДОСААФ] / Э. Борноволокнов // Наука и жизнь. 1977. № 11. С. 112–113.
3. Владимир Жаворонков: роман с наукой / [беседа с Владимиром Жаворонковым, записала Татьяна Пименова] // Вятский край. 2014. 16 дек. (№ 192). С. 6–7.
4. Воронова В. Найти свою звезду : [регистрирующее устройство к скоростному осциллографу В. И. Жаворонкова на выставке «Изобретательство и рационализация – 88»] / В. Воронова // Кировская правда. 1988. 17 апр. (№ 90). С. 4.
5. Дюшева Л. Почему витамины светятся: кировчанин создал прибор, позволяющий «вычислить» фальсифицированные лекарства / Л. Дюшева // Аргументы и время. 2006. 22 июня (№ 7). С. 20.
6. Жаворонков В. И. История сотрудничества КГПИ – МПГУ в области подготовки студентов и аспирантов за период с 1968–2018 гг. / В. И. Жаворонков ; Кировская гос. универс. обл. науч. библиотека им. А. И. Герцена, патентный сектор ; сост. Т. В. Сорокина. Киров : Герценка, 2019. 60 с.
7. Петров И. Нобелевская оценка Вятки: профессор ВятГГУ получил редкую награду: [медалью им. А. Нобеля награжден В. И. Жаворонков] / Иван Петров // Новый вариант. 2007. 15 нояб. (№ 46). С. 7: фот.
8. Vladimir Ivanovich Zhavoronkov is a Doctor of Technical Sciences, a Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Research Laboratory of Functional Electronics // READINGS IN PHYSICS AND PHYSICISTS : учеб. пособие по англ. языку / И. В. Маркова. Киров : ВятГГУ. 2015. С. 61–78.

Список литературы

1. Анализатор углового распределения аннигиляционных фотонов на основе электронно-оптического преобразователя / В. И. Жаворонков, А. Д. Мокрушин, В. Н. Бакулин, К. П. Осокин, В. М. Сюткин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 1983. № 1. С. 31–33.
2. Библиографический указатель опубликованных работ и изобретений доктора технических наук В. И. Жаворонкова / Киров. ордена Почета гос. универс. обл. науч. б-ка им. А. И. Герцена. Киров, 2016. 96 с.

3. Изучение кавитации в научно-исследовательской работе студентов / В. И. Жаворонков, Е. Н. Резник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 12. С. 142.
4. В. И. Жаворонков. Избранные научные труды по радиофизике и квантовой электронике / сост. Т. В. Сорокина, С. С. Курбатова. Киров, 2016. 200 с., ил.
5. Изменение среднего радиуса частиц коллоидной фракции иловой лечебной грязи при воздействии акустической кавитации / Д. Н. Данилов, В. И. Жаворонков, М. А. Мошкова, Е. Н. Резник, А. С. Ситяков // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностики живых систем : материалы XI Всерос. науч.-практ. конф.-выст. инновационных эколог. проектов, г. Киров, 26–28 нояб. 2013 г. Киров, 2013. С. 55–57.
6. Метод электронно-оптической регистрации сверхслабых излучений биологических объектов / В. И. Жаворонков, И. О. Рясик // Наука, информация, сознание : тезисы VI междунар. науч. конгресса по ГРБ биоэлектротраграфии. СПб., 2002. С. 76–77.
7. Научные исследования и образование в сфере нанотехнологий ВятГГУ / Д. Н. Данилов, В. И. Жаворонков // Нанотехнологии: экология, производство. 2012. № 2. С. 48–49.
8. Осциллографирование однократных быстропротекающих процессов и его применение в полупроводниковой СВЧ-электронике : дис. канд. ... физ.-мат. наук / В. И. Жаворонков. Москва : МГПИ, 1973. 189 с.
9. Осциллографирование радиопульсов с несущей СВЧ диапазона / М. М. Филиппов, А. Н. Букин, В. И. Жаворонков // Приборы и техника эксперимента. 1967. № 3. С. 88–92.
10. Осциллографическая установка для исследований в области полупроводниковой СВЧ электроники / В. И. Жаворонков, П. И. Чиликин, С. И. Жаворонков // Приборы и техника эксперимента. 1973. № 2. С. 151–154.
11. Патент на ПМ 54303 РФ, МПК А61В 6/00. Установка для просмотра рентгеновских снимков / В. И. Жаворонков, В. Ю. Зиборов, В. К. Вшивцев. 2006107157/22; заявл. 07.03.2006; опубл. 27.06.2006. Бюл. № 18. 2 с.
12. Патент на ПМ 153988 РФ, МПК Н04R 15/00. Магнитострикционный излучатель / В. И. Жаворонков, С. И. Жаворонков, В. М. Сюткин; заявитель и патентообладатель Жаворонков В. И. 2015100423/28 ; Заявл. 12.01.2015 ; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22. 2 с.
13. Применение электронно-оптического преобразователя в демонстрационном эксперименте по курсу общей физики / В. И. Жаворонков, А. Н. Мансуров // Известия высших учебных заведений. Серия : Физика. 1986. № 7. С. 112–114.
14. Применение электронной оптики в учебном физическом эксперименте: дис. ... канд. пед. наук / М. В. Горшечников. Киров, 2004. 211 с.
15. Программа 2007611053 РФ, ПСРБД 1.03. Программа создания рентгенографической базы данных / В. И. Жаворонков, В. Ю. Зиборов, В. К. Вшивцев. Опубл. 12.03.2007. Бюл. № 2 (59), (ч. 2). С. 244.
16. Регистрация пространственного распределения интенсивности флуоресценции хлорофилла / В. И. Жаворонков, Е. Н. Резник // Водные экосистемы и организмы 3. М., 2001. С. 60.
17. Специализированные высокочувствительные оптико-электронные информационно-измерительные устройства и системы для исследований однократных быстропротекающих и слабосветящихся процессов в экспериментальной физике : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.16 / В. И. Жаворонков. Киров : Изд-во ВГПУ, 1998. 300 с.
18. Специальный физический практикум : метод. указания для магистрантов физических специальностей ун-тов / С. И. Жаворонков. Киров : Изд-во ВятГУ, 2016. 82 с.
19. Экспериментальное подтверждение корпускулярной – волновой природы света / В. И. Жаворонков, С. И. Жаворонков, А. С. Минин, О. В. Фетищева // Проблемы учебного физического эксперимента : сб. науч. тр. Глазов, 2007. Вып. 25. С. 42–43.
20. Электронно-оптическая регистрация квантовых флуктуаций сверхслабых световых потоков / В. И. Жаворонков // Преподавание физики в высшей школе. 1997. № 11. С. 21–25.
21. Электронно-оптическая регистрация нестационарной адсорбции на поверхности металлов / В. И. Жаворонков, С. П. Манохин, А. А. Антонов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 1982. № 6. С. 120–123.

Results of activity of the research laboratory of functional electronics of Vyatka State University

V. I. Zhavoronkov¹, S. I. Zhavoronkov², A. S. Sityakov³

¹PhD of Physical and Mathematical Sciences, doctor of Technical Sciences, Professor,
Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: vizhavoronkov@mail.ru

²junior researcher of the laboratory of functional electronics, Vyatka State University. Russia, Kirov

³senior researcher at the laboratory of functional electronics, Vyatka State University. Russia, Kirov

Abstract. The article is devoted to the research work that was carried out on the experimental basis of the scientific laboratory of functional electronics (SL FE) KSPI (VSPU, VyatSHU, VyatSU). The activity of the laboratory covers a period of 50 years. The laboratory had joint research with a number of higher educational institutions and research institutes in Russia. The subject of the laboratory and the main stages of scientific activity are marked, the significant contribution to the scientific development of the laboratory employees S. I. Zhavoronkov and A. S. Sityakov is noted.

Scientific and pedagogical work with students of physical and chemical faculties on the implementation of term papers and theses is presented. The achievement of the Department of physics and SL FE is the admission of a number of graduates of VyatSHU to the graduate school of MPSU. An important stage of the activity OF nil functional electronics was close cooperation with SL of nanochemistry and nanotechnology of VyatSHU.

Keywords: electron, high-speed oscillography, single-time signals of nano-and picosecond duration, semiconductor microwave devices, superconductivity, electron-optical registration, low-luminous processes, luminescence, photon, particle-wave dualism of radiation, quantum optics, biophysics, nanotechnology.

References

1. *Analizator uglovogo raspredeleniya annigilyacionnykh fotonov na osnove elektronno-opticheskogo preobrazovatelya* – An analyzer of the angular distribution of annihilation photons based on an electron-optical converter / V. I. Zhavoronkov, A. D. Mokrushin, V. N. Bakulin, K. P. Osokin, V. M. Syutkin [et al.] // *Pribory i tekhnika eksperimenta* – Devices and experimental techniques. 1983. No. 1. Pp. 31–33.
2. *Bibliograficheskij ukazatel' opublikovannykh rabot i izobretenij doktora tekhnicheskikh nauk V. I. Zhavoronkova* – Bibliographic index of published works and inventions of Doctor of Technical Sciences V. I. Zhavoronkov / Kirov. State University regional scientific library n.a. A. I. Herzen of the Order of Honor. Kirov, 2016. 96 p.
3. *Izuchenie kavitacii v nauchno-issledovatel'skoj rabote studentov* – The study of cavitation in the research work of students / V. I. Zhavoronkov, E. N. Reznik // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij* – International journal of applied and fundamental research. 2010. No. 12. P. 142.
4. *V. I. Zhavoronkov. Izbrannye nauchnye trudy po radiofizike i kvantovoj elektronike* [Selected scientific works on radiophysics and quantum electronics] / comp. T. V. Sorokina, S. S. Kurbatova. Kirov. 2016. 200 p.
5. *Izmenenie srednego radiusa chastic kolloidnoj frakcii ilovoj lechebnoj gryazi pri vozdeystvii akusticheskoy kavitacii* – Change in the average radius of particles of colloid fraction of silt therapeutic mud under the influence of acoustic cavitation / D. N. Danilov, V. I. Zhavoronkov, M. A. Moshkova, E. N. Reznik, A. S. Sityakov // *Aktual'nye problemy regional'noj ekologii i biodiagnostiki zhivykh sistem : materialy XI Vseros. nauch.-prakt. konf.-vyst. innovacionnykh ekolog. proektov, g. Kirov, 26–28 noyab. 2013 g.* – Actual problems of regional ecology and biodiagnostics of living systems : materials of XI all-Russia scient.-prakt. conf.-exhibition of innovative ecological projects, Kirov, 26–28 Nov. 2013. Kirov. 2013. Pp. 55–57.
6. *Metod elektronno-opticheskoy registracii sverhslabykh izluchenij biologicheskikh ob'ektov* – Method of electron-optical registration of ultra-weak radiation of biological objects / V. I. Zhavoronkov, I. O. Rysak // *Nauka, informaciya, soznanie : tezisy VI mezhdunar. nauch. kongressa po GRB bioelektrografii* – Science, information, consciousness : theses of the VI international conference of scient. congress on GRB Bioelectrography. SPb. 2002. Pp. 76–77.
7. *Nauchnye issledovaniya i obrazovanie v sfere nanotekhnologii VyatGGU* – Scientific research and education in the field of nanotechnology VyatSHU / D. N. Danilov, V. I. Zhavoronkov // *Nanotekhnologii: ekologiya, proizvodstvo* – Nanotechnology: ecology, production. 2012. No. 2. Pp. 48–49.
8. *Oscillografirovanie odnokratnykh bystroprotekeyushchih processov i ego primenenie v poluprovodnikovoj SVCh-elektronike : dis. kand. ... fiz.-mat. nauk* – Oscillography of single-time fast-flowing processes and its application in semiconductor microwave electronics: dis. PhD ... of Physical and mathematical Sciences. / V. I. Zhavoronkov. M. MSPI. 1973. 189 p.
9. *Oscillografirovanie radioimpul'sov s nesushchej SVCh diapazona* – Oscillography of radio pulses with a carrier of the microwave range / M. M. Filippov, A. N. Bukin, V. I. Zhavoronkov // *Pribory i tekhnika eksperimenta* – Devices and equipment of the experiment. 1967. No. 3. Pp. 88–92.
10. *Oscillograficheskaya ustanovka dlya issledovanij v oblasti poluprovodnikovoj SVCh elektroniki* – Oscillographic installation for research in the field of semiconductor microwave electronics / V. I. Zhavoronkov, P. I. Chilikin, S. I. Zhavoronkov // *Pribory i tekhnika eksperimenta* – Devices and equipment of the experiment. 1973. No. 2. Pp. 151–154.
11. Patent for PM 54303 of the Russian Federation, IPC A61B 6/00. Installation for viewing x-ray images / V. I. Zhavoronkov, V. Yu. Ziborov, V. K. Vshivtsev. 2006107157/22; declared on 07.03.2006; publ. 27.06.2006. Bull. No. 18. 2 p. (in Russ.)
12. Patent for PM 153988 of the Russian Federation, IPC H04R 15/00. Magnetostrictive emitter / V. I. Zhavoronkov, S. I. Zhavoronkov, V. M. Syutkin; applicant and patentee Zhavoronkov V. I. 2015100423/28; declared on 12.01.2015; publ. 10.08.2015. Bull. No. 22. 2 p. (in Russ.)
13. *Primenenie elektronno-opticheskogo preobrazovatelya v demonstracionnom eksperimente po kursu obshchej fiziki* – Application of an electron-optical converter in a demonstration experiment on the course of general physics / V. I. Zhavoronkov, A. N. Mansurov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Seriya: Fizika* – News of higher educational institutions. Series: Physics. 1986. No. 7. Pp. 112–114.
14. *Primenenie elektronnoj optiki v uchebnom fizicheskom eksperimente: dis. ... kand. ped. nauk* – Application of electronic optics in educational physical experiment: dis. ... PhD of Ped. Sciences / M. V. Gorshechnikov. Kirov. 2004. 211 p.
15. *Programma 2007611053 RF, PSRBD 1.03. Programma sozdaniya rentgenograficheskoy bazy dannykh* – The program 2007611053 of the Russian Federation, PSRLD 1.03. Program for creating a radiographic database / V. I. Zhavoronkov, V. Yu. Ziborov, V. K. Vshivtsev. Publ. 12.03.2007. Bull. No. 2 (59), (part 2). P. 244.
16. *Registraciya prostranstvennogo raspredeleniya intensivnosti fluorescencii hlorofilla* – Registration of spatial distribution of chlorophyll fluorescence intensity / V. I. Zhavoronkov, E. N. Reznik // *Vodnye ekosistemy i organizmy 3* – Water ecosystems and organisms 3. M. 2001. P. 60.

17. *Specializirovannye vysokochuvstvitel'nye optiko-elektronnye informacionno-izmeritel'nye ustrojstva i sistemy dlya issledovanij odnokratnyh bystroprotekayushchih i slabosvetyashchihsya processov v eksperimental'noj fizike : dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.11.16* – Specialized high-sensitivity optoelectronic information-measuring devices and systems for research of single fast-flowing and low-luminous processes in experimental physics : dis. ... Dr. of Techn. Sciences: 05.11.16 / V. I. Zhavoronkov. Kirov. VSPU. 1998. 300 p.

18. *Special'nyj fizicheskij praktikum : metod. ukazaniya dlya magistrantov fizicheskikh special'nostej un-tov* – Special practical course in physics : method. instructions for graduate students of physical specialties of universities / S. I. Zhavoronkov. Kirov. VyatSU. 2016. 82 p.

19. *Eksperimental'noe podtverzhdienie korpuskulyarnoj – volnovej prirody sveta* – Experimental confirmation of the corpuscular-wave nature of light / V. I. Zhavoronkov, S. I. Zhavoronkov, A. S. Minin, O. V. Fetishcheva // *Problemy uchebnogo fizicheskogo eksperimenta : sb. nauch. tr.* – Issues of educational physical experiment : coll. of scient. works. Glazov. 2007. Is. 25. Pp. 42–43.

20. *Elektronno-opticheskaya registraciya kvantovyh fluktuacij sverhslabyh svetovyh potokov* – Electron-optical registration of quantum fluctuations of ultra-weak light flows / V. I. Zhavoronkov // *Prepodavanie fiziki v vysshej shkole* – Teaching physics in higher school. 1997. No. 11. Pp. 21–25.

21. *Elektronno-opticheskaya registraciya nestacionarnoj adsorbicii na poverhnosti metallov* – Electron-optical registration of non-stationary adsorption on the surface of metals / V. I. Zhavoronkov, S. P. Manokhin, A. A. Antonov [et al.] // *Pribory i tekhnika eksperimenta* – Devices and experimental techniques. 1982. No. 6. Pp. 120–123.

Теоретические предпосылки определения оптимальных составов смесевых топлив

С. А. Плотников¹, Ш. В. Бузиков²

¹доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения,
Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: sa_plotnikov@vyatsu.ru
²кандидат технических наук, заведующий кафедрой машин и технологии деревообработки,
Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: usr10012@vyatsu.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью применения смесевых топлив в дизелях. Целью исследования является теоретическое определение оптимальных составов смесевых топлив с учетом эффективных показателей работы дизеля. Для этой цели были проведены теоретические исследования эффективных показателей работы дизеля на разных смесевых топливах. В результате впервые был получен критерий, определяющий эффективность применения смесевых топлив разных концентраций. Анализ полученных зависимостей показал, что в значительной мере на удельный эффективный расход топлива и КПД оказывает влияние состав смесевого топлива, в котором наличие массовой доли водорода максимально, а кислорода минимально. Таким образом получен критерий для определения эффективности применения того или иного состава смесевого топлива. Представленные теоретические предпосылки позволяют определить оптимальный вид и концентрацию жидких альтернативных топлив, входящих в состав смесевых топлив.

Ключевые слова: смесевое топливо, эффективные показатели, массовая доля.

В настоящее время одним из наиболее перспективных источников тепловой энергии, используемых в качестве топлива в дизелях, является применение всевозможных смесевых топлив, получаемых путем предварительного смешивания товарного дизельного топлива (ДТ) и альтернативного [1; 11]. В качестве альтернативных топлив в смесевых топливах наиболее часто применяют спирты, эфиры и растительные масла [1, 5-7, 11]. Непосредственное использование чистых альтернативных топлив в дизелях затруднено из-за их различия в физико-химических и моторных свойствах по сравнению с чистым ДТ [8]. Основными недостатками альтернативных топлив по сравнению с ДТ являются высокая или низкая вязкость, скрытая теплота парообразования, высокая температура воспламенения, низкое цетановое число, меньшая теплотворная способность [2; 9]. На данный момент имеется достаточный объем исследований по применению различных составов смесевых топлив [3; 4; 10]. В то же время данные по оптимальным составам смесевых топлив для их применения в дизелях практически отсутствуют. В связи с этим разработка критериев определения оптимальных составов смесевых топлив является на сегодняшний день весьма актуальной задачей.

Известно, что при использовании смесевых топлив снижается часовой расход дизельного топлива, однако при этом полный часовой расход увеличивается [8-10; 12].

Основными эффективными показателями дизеля является мощность, крутящий момент, среднее эффективное давление, удельный расход топлива и КПД.

При использовании смесевых топлив одним из главных критериев является соответствие значений крутящего момента и мощности дизеля, равное его паспортным значениям, установленным заводом-изготовителем при его работе на чистом дизельном топливе. Однако разность физико-химических свойств смесевых топлив по сравнению с традиционным накладывает определенные условия, например, такие как увеличение цикловой подачи топлива, связанной с уменьшением нижней расчетной теплоты сгорания и теоретически необходимого количества воздуха.

Значение крутящего момента определялось из выражения, Н·м:

$$M_{кр} = \frac{p_e V_h n i}{\pi \tau}, \quad (1)$$

где p_e – среднее эффективное давление, МПа;

V_h – рабочий объем цилиндра, м³;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;

i – количество цилиндров, шт.;

$\pi = 3,14$;

τ – тактность.

При проведении испытаний крутящий момент определялся, Н·м:

$$M_{кр} = Flg, \quad (2)$$

где F – показания весового устройства стенда, кг;

l – плечо весового устройства стенда, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Определили среднее эффективное давление с учетом выражений (1) и (2):

$$p_e = \frac{Flg\pi\tau}{V_h n i}. \quad (3)$$

Эффективную мощность нашли, кВт:

$$N_e = \frac{p_e V_h n i}{30\tau}. \quad (4)$$

После подстановки выражения (3) в (4) получили:

$$N_e = \frac{Flg\pi}{30}. \quad (5)$$

Анализ выражений (2), (3) и (5) показал, что при использовании любого состава топлива крутящий момент, эффективная мощность и среднее эффективное давление должны соответствовать показателям работы на чистом дизельном топливе.

Отличительной особенностью применения смесевых топлив стали показатели удельного эффективного расхода топлива и КПД.

В связи с этим удельный эффективный расход топлива определили как, г/кВт·ч:

$$g_e = \frac{3600\rho_k\eta_v}{p_e l_0 \alpha}, \quad (6)$$

где ρ_k – плотность воздуха после охладителя наддувочного воздуха, кг/м³;

η_v – коэффициент наполнения дизеля с наддувом и с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха;

l_0 – теоретически необходимое количество воздуха в кг для полного сгорания 1 кг смесового топлива, кг возд./кг топл.;

α – коэффициент избытка воздуха.

Плотность воздуха после охладителя наддувочного воздуха определили:

$$\rho_k = \frac{3480p_k}{t_k + 273}, \quad (7)$$

где p_k – давление наддувочного воздуха после теплообменника дизеля с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, МПа;

t_k – температура наддувочного воздуха после теплообменника, °С.

$$\eta_v = \frac{33,3G_B}{V_h n i \rho_k}, \quad (8)$$

где G_B – часовой расход воздуха, кг/ч.

Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг смесового топлива определили:

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right), \quad (9)$$

где C – массовая доля углерода в 1 кг смесового топлива, кг;

H – массовая доля водорода в 1 кг смесового топлива, кг;

O – массовая доля кислорода в 1 кг смесового топлива, кг;

Элементный состав жидких смесевых топлив выразили:

$$\sum_{i=1}^n (C_i + H_i + O_i) m_i = 1, \quad (10)$$

где C_i – массовая доля углерода в 1 кг i -ого компонента смеси, кг;

H_i – массовая доля водорода в 1 кг i -ого компонента смеси, кг;

O_i – массовая доля кислорода в 1 кг i -ого компонента смеси, кг;

m_i – масса i -ого компонента в смеси;

n – количество компонентов в смеси, шт.

Тогда массовую долю углерода в 1 кг смесового топлива нашли:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i m_i, \quad (11)$$

Массовая доля водорода в 1 кг смесового топлива определялась:

$$H = \sum_{i=1}^n H_i m_i, \quad (12)$$

Массовую долю кислорода в 1 кг смесового топлива нашли:

$$O = \sum_{i=1}^n O_i m_i, \quad (13)$$

После подстановки (11), (12) и (13) в (9) получили:

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \sum_{i=1}^n C_i m_i + 8 \sum_{i=1}^n H_i m_i - \sum_{i=1}^n O_i m_i \right) \quad (14)$$

Из полученного выражения видно, что чем больше массовая доля водорода в 1 кг смесового топлива и чем меньше массовая доля кислорода в 1 кг смесового топлива, тем большее количество воздуха потребуется для сгорания 1 кг смесового топлива.

Коэффициент избытка воздуха нашли:

$$\alpha = \frac{G_B}{G_r l_0}, \quad (15)$$

где G_r – часовой расход смесового топлива, кг/ч.

После подстановки выражений (3), (8) в (6) и преобразований получили:

$$g_e = \frac{3600 \cdot 33,3 G_B}{Flg\pi\tau l_0 \alpha}. \quad (16)$$

Так как коэффициент избытка воздуха и часовой расход воздуха взаимосвязаны, то основным критерием, определяющим значение удельного эффективного расхода смесового топлива, явилось теоретически необходимое количество воздуха в кг для полного сгорания 1 кг смесового топлива.

Эффективный КПД находили:

$$\eta_e = \frac{p_e \alpha l_0}{\rho_k \eta_v H_n}, \quad (17)$$

где H_n – низшая расчетная теплота сгорания смесового топлива, МДж/кг.

$$H_n = 33,91C + 125,60H - 10,89O - 2,51 \cdot 9H, \quad (18)$$

где C – массовая доля углерода в 1 кг смесового топлива, кг;

H – массовая доля водорода в 1 кг смесового топлива, кг;

O – массовая доля кислорода в 1 кг смесового топлива, кг;

Учитывая выражения (11), (12), (13), получили:

$$H_n = 33,91 \sum_{i=1}^n C_i m_i + 125,60 \sum_{i=1}^n H_i m_i - 10,89 \sum_{i=1}^n O_i m_i - 2,51 \cdot 9 \sum_{i=1}^n H_i m_i \quad (19)$$

Анализ полученного выражения показал, что чем больше массовая доля водорода в 1 кг смесового топлива и чем меньше массовая доля кислорода в 1 кг смесового топлива, тем большее значение теплоты выделится при сгорании 1 кг смесового топлива.

После подстановки выражений (3), (8) в (11) и преобразований получили:

$$\eta_e = \frac{Flg\pi\tau l_0 \alpha}{33,3 G_B H_n}. \quad (20)$$

По аналогии с выражением (16) коэффициент избытка воздуха и часовой расход воздуха взаимосвязаны, определяющим критерием значения эффективного КПД стало отношение теоретически необходимого количества воздуха в кг для полного сгорания 1 кг смесового топлива к низшей расчетной теплоте сгорания смесового топлива, кг возд./МДж:

$$\frac{l_0}{H_n} \quad (21)$$

Данный критерий показывает, какое количество кг воздуха необходимо для выделения 1 МДж теплоты из 1 кг смесового топлива.

Анализ выражения (21) показал, что в значительной мере на удельный эффективный расход топлива и КПД оказывает влияние состав смесового топлива, в котором наличие массовой доли водорода будет максимально, а кислорода минимально.

Таким образом получен критерий для определения эффективности применения того или иного состава смесового топлива.

Представленные теоретические предпосылки позволяют определить оптимальный вид и концентрацию жидких альтернативных топлив, входящих в состав смесовых топлив.

Список литературы

1. Инновационные технологии производства биотоплива второго поколения / В. Ф. Федоренко [и др.]. М. : Изд-во ФГНУ «Росинформагротех», 2009. 68 с.
2. *Карташевич А. Н., Плотников С. А., Товстыка В. С.* Оптимизация параметров топливоподачи тракторного дизеля для работы на рапсовом масле // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 3. С. 13–16.
3. *Карташевич А. Н., Плотников С. А., Товстыка В. С.* Применение топлив на основе рапсового масла в тракторных дизелях : монография. Киров : Авангард, 2014. 144 с.
4. Определение эксплуатационных показателей трактора «Беларус-922» при работе на смесовом топливе / С. А. Плотников [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 3. С. 445–459.
5. *Плотников С. А., Бузиков Ш. В., Козлов И. С.* Определение влияния топливных присадок на кинематическую вязкость смесового топлива // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018) : сб. ст. XVIII Всероссийской науч.-практ. конф. : в 3 т. Киров : Изд-во ВятГУ, 2018. С. 766–771.
6. *Плотников С. А., Бузиков Ш. В., Козлов И. С.* Определение влияния компонентного состава топливной смеси на кинематическую вязкость // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018) : сб. ст. XVIII Всероссийской науч.-практ. конф. : в 3 т. Киров : Изд-во ВятГУ, 2018. С. 759–765.

7. Плотников С. А., Карташевич А. Н., Черемисинов П. Н. Улучшение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом для использования в тракторных дизелях // Двигателестроение. 2017. № 4 (270). С. 21–24.
8. Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Недостатки применения топлив на основе рапсового масла в дизельных двигателях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 4-1 (15-1). С. 97–101.
9. Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Влияние присадок на кинематическую вязкость топлив на основе рапсового масла // Общество, наука, инновации (НПК-2016) : сб. ст. 2-е изд., испр. и доп. Киров : Изд-во ВятГУ, 2016. С. 1378–1382.
10. Плотников С. А., Карташевич А. Н., Черемисинов П. Н. Определение оптимальных регулировок системы топливоподачи двигателя 4ч 11,0/12,5 при работе на смесях рапсового масла с дизельным топливом // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017) : сб. ст. Всероссийской ежегодной науч.-практ. конф. Киров : Изд-во ВятГУ, 2017. С. 1841–1847.
11. Результаты испытаний и перспективы эксплуатации дизелей на биотопливе / В. Ф. Федоренко. М. : Изд-во ФГНУ «Росинформагротех», 2008. 133 с.
12. Plotnikov S. A., Kartashevich A. N., Buzikov S. V. Analysis of pre-heated fuel combustion and heat-emission dynamics in a diesel engine Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах). 2018. Т. 944. 012089 с.

Theoretical background for determining the optimal composition of mixed fuels

S. A. Plotnikov¹, Sh. V. Buzikov²

¹Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of mechanical engineering technology, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: sa_plotnikov@vyatsu.ru

²PhD of Technical Sciences, head of the Department of machinery and woodworking technology, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: usr10012@vyatsu.ru

Abstract. The relevance of the study is due to the need to use mixed fuels in diesels. The aim of the study is to determine theoretically the optimal composition of mixed fuels, taking into account the effective performance of the diesel engine. For this purpose, theoretical studies of the effective performance of diesel on different mixed fuels were carried out. As a result, for the first time a criterion was obtained that determines the effectiveness of the use of mixed fuels of different concentrations. The analysis of the obtained dependences showed that the specific effective fuel consumption and efficiency is significantly influenced by the composition of the mixed fuel, in which the presence of the mass fraction of hydrogen is maximum and oxygen is minimal. Thus, a criterion for determining the effectiveness of a particular composition of mixed fuel is obtained. The presented theoretical assumptions allow us to determine the optimal type and concentration of liquid alternative fuels included in the composition of mixed fuels.

Keywords: mixed fuel, effective indicators, mass fraction.

References

1. *Innovacionnye tekhnologii proizvodstva biotopliva vtorogo pokoleniya* [Innovative technologies for the production of second-generation biofuels] / V. F. Fedorenko [et al.]. M. Rosinformagroteh. 2009. 68 p.
2. Kartashevich A. N., Plotnikov S. A., Tovstyka V. S. *Optimizaciya parametrov toplivopodachi traktornogo dizelya dlya raboty na rapsovom masle* [Optimization of parameters of fuel supply of tractor diesel for work on rapeseed oil] // *Traktory i sel'hozmashiny* – Tractors and agricultural machines. 2011. No. 3. Pp. 13–16.
3. Kartashevich A. N., Plotnikov S. A., Tovstyka V. S. *Primenenie topliv na osnove rapsovogo masla v traktornyh dizelyah : monografiya* [The use of fuels based on rapeseed oil in the tractor diesel engines : monograph]. Kirov. Avangard. 2014. 144 p.
4. *Opredelenie ekspluatatsionnyh pokazatelej traktora "Belarus-922" pri rabote na smesevom toplive* [Determination of operational indicators of the tractor "Belarus-922" when working on mixed fuel] / S. A. Plotnikov [et al.] // *Vestnik Mordovskogo universiteta* – Herald of the Mordovian University. 2018. Vol. 28. No. 3. Pp. 445–459.
5. Plotnikov S. A., Buzikov Sh. V., Kozlov I. S. *Opredelenie vliyaniya toplivnyh prisadok na kinematicheskuyu vyazkost' smesevogo topliva* [Determining the effect of fuel additives on the kinematic viscosity of mixed fuel] // *Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2018) : sb. st. XVIII Vserossijskoj nauch.-prakt. konf. : v 3 t.* – Society. The science. Innovations (NPK-2018) : collection of article XVIII of the all-Russian scient.-pract. conf. : in 3 vols. Kirov. VyatSU. 2018. Pp. 766–771.
6. Plotnikov S. A., Buzikov Sh. V., Kozlov I. S. *Opredelenie vliyaniya komponentnogo sostava toplivnoj smesi na kinematicheskuyu vyazkost'* [Determination of the influence of the component composition of the fuel mixture on the kinematic viscosity] // *Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2018) : sb. st. XVIII Vserossijskoj nauch.-prakt. konf. : v 3 t.* – Society. The science. Innovations (NPK-2018) : collection of article XVIII of the all-Russian scient.-pract. conf. : in 3 vols. Kirov. VyatSU. 2018. Pp. 759–765.
7. Plotnikov S. A., Kartashevich A. N., Cheremisinov P. N. *Uluchshenie smesey dizel'nogo topliva s rapsovim maslom dlya ispol'zovaniya v traktornyh dizelyah* [Improving mixtures of diesel fuel with rapeseed oil for use in tractor diesels] // *Dvigatelistroenie* – Engine building. 2017. No. 4 (270). Pp. 21–24.

8. Plotnikov S. A., Cheremisinov P. N. *Nedostatki primeneniya topliv na osnove rapsovogo masla v dizel'nyh dvigatelyah* [Disadvantages of using rapeseed oil-based fuels in diesel engines] // *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* – Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3. No. 4-1 (15-1). Pp. 97–101.

9. Plotnikov S. A., Cheremisinov P. N. *Vliyanie prisadok na kinematicheskuyu vyazkost' topliv na osnove rapsovogo masla* [Influence of additives on the kinematic viscosity of fuels based on rapeseed oil] // *Obshchestvo, nauka, innovacii (NPK-2016) : sb. st. 2-e izd., ispr. i dop.* – Society, science, innovation (NPK-2016) : col. art. 2nd ed., corr., add. Kirov. VyatSU. 2016. Pp. 1378–1382

10. Plotnikov S. A., Kartashevich A. N., Cheremisinov P. N. *Opredelenie optimal'nyh regulirovok sistemy toplivopodachi dvigatelya 4ch 11,0/12,5 pri rabote na smesyah rapsovogo masla s dizel'nyim toplivom* [Determination of optimal adjustments of the fuel supply system of the 4h 11.0/12.5 engine when working on mixtures of rapeseed oil with diesel fuel] // *Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2017) : sb. st. Vserossijskoj ezhegodnoj nauch.-prakt. konf.* – Society. The science. Innovations (NPK-2017) : collection of articles of the all-Russian annual scientific-pract. conf. Kirov. VyatSU. 2017. Pp. 1841–1847.

11. *Rezultaty ispytaniy i perspektivy ekspluatscii dizelej na biotoplive* [Test results and prospects of operation of diesel engines on biofuel] / V. F. Fedorenko. M. Rosinformagroteh. 2008. 133 p.

12. Plotnikov S. A., Kartashevich A. N., Buzikov S. V. Analysis of pre-heated fuel combustion and heat-emission dynamics in a diesel engine *Journal of Physics: Conference Series* (see in books). 2018. Vol. 944. 012089 p.

О совместной работе синхронных машин

В. Н. Кузнецов

кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроники
Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: kaf_eie@vyatsu.ru

Аннотация. Трехфазные синхронные генераторы электростанций работают, как правило, совместно. Теория совместной работы синхронных машин разработана давно и является классической. Однако изложение этой теории в литературе сопровождается многочисленными противоречиями, неточностями и даже ошибками. Это связано главным образом с произвольным, ничем не обоснованным выбором положительных направлений электрических величин на электрических схемах, с неверной трактовкой законов Кирхгофа, встречного и согласного включения синхронных генераторов.

В статье показано, что параллельное соединение двух синхронных генераторов – это их встречное (не согласное и не противофазное) включение, так как обмотки фаз генераторов соединены между собой одноименными выводами. Напряжение между этими выводами является общим для обоих генераторов. Отдельный генератор, включенный в сеть, становится частью ее, и из своего у него остается только ЭДС и механический момент на валу.

Ключевые слова: синхронный генератор, электрическая сеть, электрическое напряжение, ЭДС, параллельное соединение.

Совместная работа синхронных генераторов предполагает параллельное соединение их статорных (якорных) обмоток. Внутреннее сопротивление каждой фазы полученного таким образом эквивалентного генератора практически равно нулю. Поэтому электрическую сеть с таким источником можно считать трехфазным симметричным идеальным источником синусоидального напряжения, в котором фазные напряжения равны одноименным фазным ЭДС, амплитуды и действующие значения напряжений всех трех фаз и частоты этих напряжений равны между собой и являются постоянными величинами.

Идеальным условием включения синхронного генератора в такую сеть является равенство мгновенных значений фазных напряжений генератора и сети: равенство амплитуд, частот и начальных фаз напряжений «(совпадение по фазе векторов \dot{U}_C и $\dot{U}_Г$)» [2, с. 335]. Однако описание последующей совместной работы этой машины с сетью не выдерживает никакой критики.

Цель данной статьи – показать характерные ошибки в изложении теории совместной работы синхронных машин в учебной литературе и выразить мнение по этой проблеме.

Авторы цитируемого выше учебника утверждают: «После включения генератора в сеть его напряжение U становится равным напряжению сети U_C . Относительно внешней нагрузки напряжения U и U_C совпадают по фазе, а по контуру “генератор – сеть” находятся в противофазе, т. е. $\dot{U} = -\dot{U}_C$ (рис. 1а). При точном выполнении <...> условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток I_a после подключения машины к сети равняется нулю. <...> Если к валу генератора приложить внешний момент, <...> то <...> вектор \dot{E}_0 смещается относительно вектора \dot{U} на некоторый угол θ (рис. 1б). <...> При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность. <...> Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор \dot{E}_0 будет отставать от вектора напряжения \dot{U} на угол θ (рис. 1в).

Следовательно, в рассматриваемом режиме <...> машина работает двигателем. <...> Однако для синхронного двигателя в приведенные уравнения вместо напряжения машины \dot{U} надо подставить – \dot{U}_C , так как термин «напряжение двигателя» обычно не употребляется» [2, с. 336, 337, 353].

Налицо, как видим, парадоксальная ситуация.

Казалось бы, предусмотрели все: сравняли напряжения сети и подключаемого генератора как по амплитуде, так и по частоте, и по фазе; не забыли и о порядке следования фаз. Но как только ге-

нератор подключили к сети, фаза напряжения генератора изменилась на 180° (вектор \dot{U} повернулся на 180°). Возникает вопрос: как генератор почувствовал, что его уже подключили к сети (тока нет) и по какому сигналу вектор напряжения повернулся на 180° ?

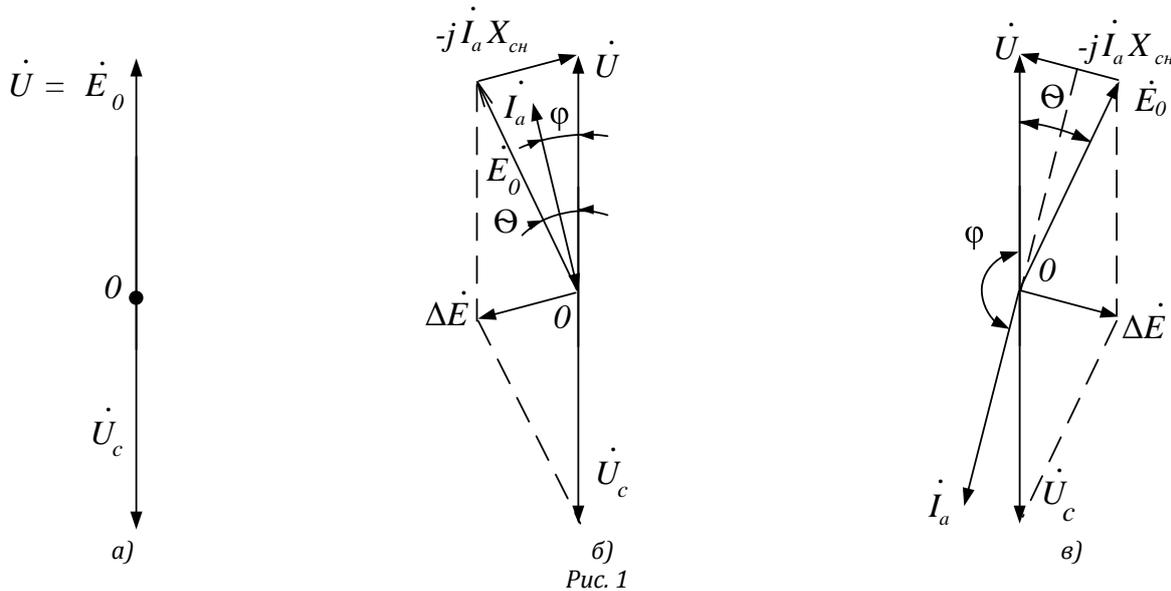


Рис. 1

Допустим, что авторы учебника правы – после подключения генератора к сети сложилась описанная выше ситуация (рис. 1а). Предположим, что параметры сети (эквивалентного генератора) и присоединенного к нему генератора одинаковы. В результате получили: два одинаковых генератора соединены между собой в двух точках (для одной фазы), и при этом их напряжения находятся в противофазе. А теперь к этим точкам попытаемся подключить еще один генератор. Сразу же возникает новый вопрос: при его синхронизации на какое из этих двух напряжений ориентироваться? (Оба генератора равноправны и оба претендуют на роль сети.) Задача неразрешимая с точки зрения теории, изложенной в рассматриваемом учебнике. И не только в этом учебнике, к сожалению.

Некоторые авторы вообще предлагают подключать генераторы к сети в момент, когда напряжения генератора и сети сдвинуты по фазе на 180° , заявляя, что уравнивающего тока в этом случае не будет. Так, Н. П. Ермолин считает, что для включения генератора в сеть необходимо установить «равенство фазных напряжений машины и сети $U = U_C$ и совпадение их по фазе во внешней цепи нагрузки (или сдвиг по фазе на 180° во внутренней цепи машин). <...> При включении генератора <...> никакого тока в цепи статора не будет, так как ЭДС его равна и прямо противоположна по фазе напряжению сети» [3, с. 178, 179, 184]. Об этом же говорит в своем учебнике и А. В. Иванов-Смоленский. Правда, как это ни странно, в своих теоретических построениях он игнорирует законы Кирхгофа и Ома. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить рисунки 58-2, 58-3 и формулы (58.1) – (58.4) [4, с. 136–139].

А вот как изложена синхронизация генератора Н. Ф. Котеленцем, одним из авторов учебного пособия [1]. Он использует известную схему с ламповым синхроскопом на погасание света и схему замещения одной фазы, которая аналогична схеме, показанной на рис. 2а, только стрелка, указывающая положительное направление напряжения генератора, имеет противоположное направление.

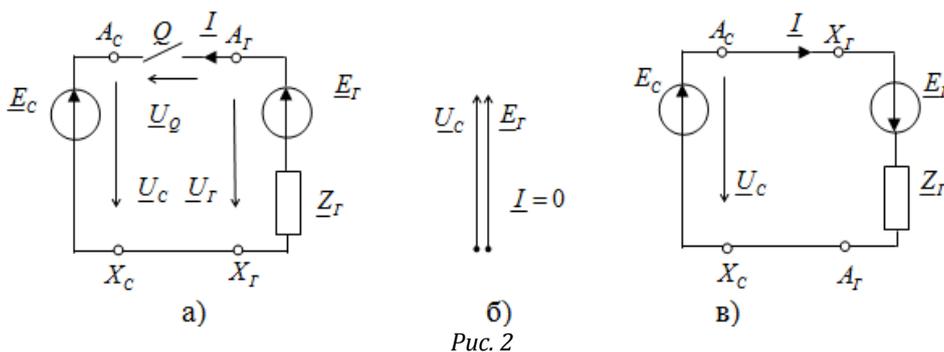


Рис. 2

Итак, читаем: «При замыкании рубильника <...> ток синхронизации I_c определяется по формуле:

$$\dot{I}_c = (\dot{E}_r - \dot{E}_c) / Z_a = (\dot{U}_r - \dot{U}_c) / Z_a,$$

где \dot{E}_r , \dot{E}_c (\dot{U}_r , \dot{U}_c) – ЭДС (напряжения) генератора и сети соответственно; Z_a – полное сопротивление обмотки якоря генератора. Чтобы ток \dot{I}_c был равен нулю (в контуре $E_r - E_c$), необходимо выполнение следующих условий: ЭДС генератора \dot{E}_r и сети \dot{E}_c должны быть равны по значению и находиться в противофазе. При отключенном рубильнике <...> между контактами рубильника действует ЭДС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_r - \dot{E}_c = \dot{E}_{10} - \dot{E}_c$. Регулированием тока возбуждения генератора добиваются равенства ЭДС E_r и E_c , контролируя их значения с помощью вольтметров. Наиболее благоприятным для включения генератора в сеть является момент, когда $\Delta E = 0$ <...> и лампы не горят. Если в этот момент замкнуть рубильник, ток в <...> генераторе будет равен нулю» [1, с. 199–201].

В этой короткой выписке имеются, как минимум, пять ошибок. Так, в выделенной формуле перед напряжением генератора должен стоять знак минус, так как, согласно закону Кирхгофа, $\dot{U}_r = -\dot{E}_r$; в знаменателе формулы должно быть комплексное сопротивление, а не полное. Между контактами рубильника «действует» напряжение, но никак не ЭДС. Далее. Два равных по значению комплексных числа (ЭДС генератора и сети в условии синхронизации) принципиально не могут находиться в противофазе. (Равенство комплексных чисел заключается в равенстве не только их модулей, но и аргументов.) Допустим, что в текст вкралась опечатка и условием синхронизации является равенство действующих значений (не комплексных) противофазных ЭДС. В этом случае $\Delta \dot{E} = \dot{E}_r - \dot{E}_c = \dot{E}_r - (-\dot{E}_r) = 2\dot{E}_r$, т. е. результат противоположен предсказанному автором пособия: яркость ламп наибольшая, ток в момент включения равен удвоенному току короткого замыкания генератора. (И последнее: вольтметром измеряют напряжение, а не ЭДС.)

Продолжим чтение: «После включения генератора в сеть <...> его напряжение $\dot{U}_r = -\dot{E}_{10}$ уравновешивает напряжение сети, при этом $\Delta \dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_c = 0$. Ток в цепи якоря также равен нулю». (На диаграмме изображены два вектора (\dot{U}_r и \dot{U}_c), равной длины и сдвинутые относительно друг друга на 180° . Сумма (не разность) этих векторов действительно равна нулю.) А далее следует нечто невероятное: «Если теперь увеличить ток возбуждения..., то ЭДС \dot{E}_{10} и напряжение \dot{U}_r возрастут, а $\Delta \dot{U} \neq 0$. Под действием разности напряжений $\Delta \dot{U}$ в цепи якоря возникнет ток. <...> Если при $\Delta \dot{U} = 0$ уменьшать ток возбуждения, то ЭДС E_{10} и напряжение U_r будут уменьшаться, а вектор $\Delta \dot{U}$ изменит свое направление. <...> При дальнейшем уменьшении тока возбуждения разность напряжений будет увеличиваться, а ток якоря – возрастать» [1, с. 207]. (На диаграммах изображены сдвинутые относительно друг друга на 180° векторы \dot{U}_r и \dot{U}_c и суммарный вектор $\Delta \dot{U}$, обуславливающий ток генератора. При этом на одной диаграмме вектор \dot{U}_r длиннее вектора \dot{U}_c , а на другой – короче.)

То, что сумму векторов автор пособия называет разностью, – это не главное. Суть в другом. Представим себе следующую ситуацию. Выводы генератора и электрической сети соединены между собой (речь идет об одной фазе), а к точкам соединения этих выводов подключены два одинаковых вольтметра: один для измерения напряжения сети, другой – генератора. Показания приборов одинаковы. Оператор стал изменять ток возбуждения генератора и показание одного вольтметра остается неизменным, а показание другого изменяется?!

Нелепость «теории» становится еще более выпуклой, когда речь заходит о синхронных двигателях. Напряжение на выводах работающего двигателя – это не что иное, как напряжение сети, к которой подключен двигатель. Это – истина, не требующая доказательств. Авторы же пособия и иже с ними считают, что напряжение двигателя существует само по себе, что оно противофазно напряжению сети и уравновешивает его [1, с. 212].

И последняя выписка, относящаяся к рассматриваемой теме: «При этих условиях в контуре «сеть – машина» сумма ЭДС равна нулю. <...> Говорят, что при синхронизации ЭДС находятся в противофазе, имея в виду, что они уравновешивают друг друга: $\dot{U}_c + \dot{E}_0 = 0$. <...> E_0 – ЭДС генератора ... и в обмотке якоря машины ток равен нулю» [5, с. 420, 424]. И здесь не по Кирхгофу: сумма ЭДС вместо разности, противофазные напряжения сети и генератора и т. д.

Общим для всех этих выдержек является то, что режим короткого замыкания подключенного к сети генератора преподносится читателю в качестве режима холостого хода. А далее, исходя из

этой ложной предпосылки, строится вся теория. Поэтому авторам невольно приходится вместо одного напряжения вводить два одновременно существующих и находящихся в противофазе напряжения – сети и генератора, сети и двигателя; питать синхронный двигатель не от реально существующей сети (с напряжением \dot{U}_C), а от ее зеркального отображения (с напряжением минус \dot{U}_C); о погасшей лампе говорить, что она светит ярко, и, наоборот, о ярко горящей лампе говорить, что она погасла и т. п.

Два синхронных генератора (как и два источника постоянного тока) можно соединить между собой либо последовательно, либо параллельно. Параллельное соединение – это встречное соединение источников, так как обмотки фаз генераторов соединяются между собой одноименными выводами. Напряжение между этими точками (выводами) является общим для обоих генераторов. Перед подключением генератора к сети он имеет свои ЭДС, и напряжение. Но как только его присоединили к сети, генератор становится частью ее и из своего у него остается только ЭДС и механический момент на валу. В контуре «генератор – сеть» ЭДС генератора и сети направлены навстречу друг другу и – в режиме холостого хода генератора – совпадают по фазе (не в противофазе!). Поэтому в любой момент времени они имеют равные (по значению и по направлению) мгновенные значения (уравнивают друг друга), их разность равна нулю, соответственно, отсутствует и уравнивающий ток между генератором и сетью. Это можно показать, используя схему замещения одной фазы (рис. 2а), где величины с индексом «С» относятся к сети, а с индексом «Г» – к генератору.

Согласно 2-му закону Кирхгофа, в любом режиме $\underline{U}_C = \underline{E}_C$. В режиме холостого хода генератора $\underline{U}_G = \underline{E}_G$. Напряжение на выключателе Q равно разности напряжений (ЭДС) генератора и сети:

$$\underline{U}_Q = \underline{U}_G - \underline{U}_C = \underline{E}_G - \underline{E}_C.$$

Генератор подключают к сети при $\underline{U}_Q = 0$, т. е. при $\underline{U}_G = \underline{U}_C = \underline{E}_G = \underline{E}_C$. При этом, согласно закону Ома, ток генератора определяется разностью ЭДС генератора и напряжения сети (а не их суммой, как утверждают цитируемые учебники):

$$\underline{I} = (\underline{E}_G - \underline{U}_G) / \underline{Z}_G = (\underline{E}_G - \underline{U}_C) / \underline{Z}_G = 0.$$

Следовательно, и после подключения к сети генератор остается в режиме холостого хода. На рис. 2б показана векторная диаграмма, соответствующая этому режиму.

Если два генератора (генератор и сеть) соединены между собой параллельно (именно параллельно), их ЭДС (напряжения) не могут находиться в противофазе принципиально. Если же в контуре «генератор – сеть» ЭДС (напряжения) генератора и сети находятся в противофазе (что, по утверждению цитируемых учебников, соответствует режиму холостого хода), значит, обмотки фаз генераторов соединены между собой разноименными выводами (рис. 2в). А это уже не параллельное, а последовательное (согласное) соединение источников. В этом случае ЭДС источников, находясь в фазе (изменение направления ЭДС генератора на рис. 2в равносильно изменению ее фазы на 180°), складываются и создают в контуре ток

$$\underline{I} = (\underline{E}_G + \underline{U}_G) / \underline{Z}_G = (\underline{E}_G + \underline{U}_C) / \underline{Z}_G,$$

который представляет собой не что иное, как двойной ток короткого замыкания генератора (при удвоенной ЭДС).

Таким образом, вместо ожидаемого режима холостого хода получили аварийный режим – режим короткого замыкания. Векторная диаграмма напряжений, приведенная на рис. 1а, отражает именно режим короткого замыкания, а не холостого хода.

В подтверждение сказанного выше рассмотрим две следующие ситуации.

Два человека, стоя в качелях лицом друг к другу, пытаются раскачать их. При этом они синхронно совершают абсолютно одинаковые движения с одинаковыми усилиями: толкают качели то вперед, то назад. Их движения находятся в фазе, а качели остаются неподвижными, так как усилия людей в любой момент времени уравновешены (равны и направлены встречно).

А теперь представим, что эти двое совершают такие же движения, что и в первом случае, но со сдвигом по фазе на 180° : один толкает вперед, а другой – назад и наоборот. Качели в этом случае будут качаться, причем амплитуда колебаний будет в два раза больше, чем от усилий только одного человека.

Вторую ситуацию можно заменить равноценной (эквивалентной): движения обоих субъектов находятся в фазе, но один из них предварительно повернулся на 180° .

В рассмотренных ситуациях люди являются аналогами генераторов, их усилия – аналогами ЭДС генераторов, а колебания качелей – аналогом тока в контуре. В первой ситуации с качелями имеем встречное (параллельное), во второй – согласное (последовательное) соединение.

Могут ли два находящиеся в противофазе и имеющих одинаковые амплитуды колебательных процесса уравновесить друг друга? Не могут, так как ни в один момент времени они не имеют равных мгновенных значений (кроме нулевых). Если, например, чашки весов уравновешены, значит, разность (не сумма) их масс равна нулю. А какое может быть равновесие, если одна чашка занимает крайнее верхнее, а другая – крайнее нижнее положение (одно напряжение имеет положительный максимум, а другое в это же время – отрицательный максимум)?

Если два колебательных процесса совпадают по фазе, то относительно чего бы их не рассматривать (хоть «относительно внешней нагрузки», хоть «по контуру «генератор – сеть») – они все равно находятся в фазе. Это очевидно.

Итак, установили, что синхронная машина, подключенная к сети, находится под напряжением этой сети. Если на векторных диаграммах (рис. 1) убрать вектор напряжения синхронной машины (вектор \dot{U}), то на векторной диаграмме генератора (рис. 1б) ЭДС будет отставать по фазе от напряжения сети (и генератора), а на диаграмме двигателя (рис. 1в), наоборот, ЭДС будет опережать по фазе напряжение сети. А это противоречит физическому смыслу и всей теории синхронных машин.

Кроме того, угол между векторами \dot{E}_0 и \dot{U}_C (угол нагрузки) и в генераторе, и в двигателе больше 90° . В этих условиях устойчиво синхронная машина работать не может. Рассмотрим ситуацию с энергетических позиций. В соответствии с векторными диаграммами электромагнитная и электрическая активная мощности как генератора, так и двигателя имеют разные знаки, что также противоречит физическому смыслу. Исходя из того что на векторной диаграмме перевозбужденного генератора уравнительный ток опережает по фазе напряжение сети, авторы цитируемых учебников желаемое выдают за действительное: «Перевозбужденная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна емкости» [2, с. 338]. Здесь уместно напомнить, что ток в емкостном элементе опережает по фазе напряжение только в том случае, когда положительные направления тока и напряжения совпадают. В противном случае ток отстает по фазе от напряжения. В рассматриваемой ситуации положительные направления тока и напряжения сети противоположны (противный случай), поэтому генератор «относительно сети эквивалентен» индуктивному элементу, а не «емкости».

Как видим, неточность следует за неточностью. А началось все с того, что встречное направление ЭДС (напряжений) в контуре «сеть – машина» было ошибочно принято за противофазное включение.

Чтобы устранить противоречия и привести теорию в соответствие с практикой, следует исходить из того, что отдельная синхронная машина, включенная в сеть, находится под напряжением сети. При идеальном холостом ходе мгновенное значение ее ЭДС равно мгновенному значению напряжения (рис. 2б). Двигатель следует рассматривать не как источник электроэнергии с отрицательной электромагнитной мощностью (некое теоретическое надуманное построение), а как активный приемник электроэнергии с положительной мощностью. Если в схеме замещения якоря турбогенератора (рис. 3а) положительное направление напряжения противоположно направлениям тока и ЭДС, то в схеме замещения турбодвигателя (рис. 4а) положительное направление тока следует выбрать совпадающим с направлением напряжения, т. е. изменить его направление по сравнению с генератором на противоположное. Поэтому уравнения электрического состояния генератора и двигателя отличаются друг от друга только знаком тока якоря. Для генератора: $\underline{E}_0 - R\underline{I} - jX\underline{I} = \underline{U}$, а для двигателя: $\underline{E}_0 + R\underline{I} + jX\underline{I} = \underline{U}$, где R и X – активное и синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря. На основании этих уравнений на рис. 3б построена векторная диаграмма генератора, а на рис. 4б – двигателя.

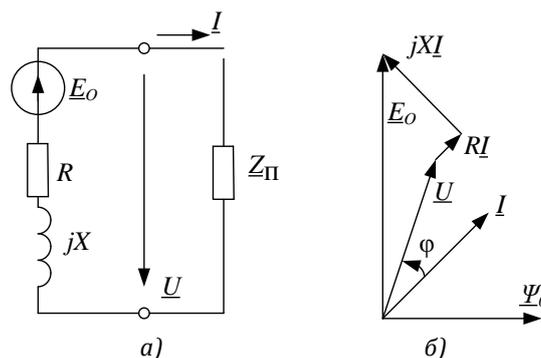


Рис. 3



Рис. 4

В результате все становится на свои места: генератор преобразует механическую энергию в электрическую, двигатель – электрическую в механическую; при увеличении момента на валу машины – вращающего в генераторе, тормозящего в двигателе – угол нагрузки увеличивается от нулевого значения (не уменьшается от 180 градусов); в любом режиме работы машины коэффициент мощности ее сохраняет положительное значение и выполняется баланс реактивных мощностей машины и сети, перевозбужденная машина является источником индуктивной (приемником емкостной) энергии, недо возбужденная – приемником индуктивной (источником емкостной) энергии.

Список литературы

1. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. Электрические машины : учеб. пособие для студентов вузов. М. : Академия, 2006. 320 с.
2. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины : учебник для электротехн. спец. вузов. М. : Высш. шк., 1990. 528 с.
3. Ермолин Н. П. Электрические машины : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1975. 295 с.
4. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины : учебник для вузов : в 2 т. Т. 2. М. : Изд-во МЭИ, 2004. 532 с.
5. Копылов И. П. Электрические машины : учебник для вузов. М. : Высш. шк. ; Логос, 2000. 607 с.

About joint work of synchronous machines

V. N. Kuznetsov

PhD of Technical Sciences, associate professor of the Department of electrical engineering and electronics, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: kaf_eie@vyatsu.ru

Abstract. Three-phase synchronous generators of power plants usually work together. The theory of joint operation of synchronous machines has been developed for a long time and is a classic one. However, the presentation of this theory in the literature is accompanied by numerous contradictions, inaccuracies and even errors. This is mainly due to the arbitrary, unjustified choice of positive directions of electrical quantities on electrical circuits, with an incorrect interpretation of the Kirghoff laws, counter and consonant switching of synchronous generators.

The article shows that the parallel connection of two synchronous generators is their counter (not consonant and not antiphase) inclusion, since the phase windings of the generators are connected to each other by the same conclusions. The voltage between these terminals is common to both generators. A separate generator, included in the network, becomes part of it, and from its own it has only EMF and mechanical moment on the shaft.

Keywords: synchronous generator, electrical network, electric current, electromotive force, parallel connection.

References

1. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. *Электрические машины : учеб. пособие для студентов вузов* [Electric machines : training manual for university students]. М. Академия. 2006. 320 p.
2. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. *Электрические машины и микромашины : учебник для электротехн. спец. вузов* [Electric machines and micromachines : textbook for electrical engineering. spec. of higher education]. М. Vyssh. shkola. 1990. 528 p.
3. Ермолин Н. П. *Электрические машины : учебник для вузов* [Electric machines : textbook for universities]. М. Vyssh. shkola. 1975. 295 p.
4. Иванов-Смоленский А. В. *Электрические машины : учебник для вузов : в 2 т.* [Electric machines : textbook for universities: in 2 vols.] Vol. 2. М. МЭИ. 2004. 532 p.
5. Копылов И. П. *Электрические машины : учебник для вузов* [Electric machines : textbook for universities]. М. Vyssh. Shkola ; Logos. 2000. 607 p.

Посадки в клеевых соединениях на прямоугольные шипы

О. А. Рублева¹, А. Г. Гороховский²

¹кандидат технических наук, доцент кафедры машин и технологии деревообработки,
Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: olga_ru@vyatsu.ru

²доктор технических наук, и.о. зав. кафедрой автоматизации и инновационных технологий,
Уральский государственный лесотехнический университет.
Россия, г. Екатеринбург. E-mail: goralegr@yandex.ru

Аннотация. Склеивание деревянных заготовок по длине на прямоугольные шипы является перспективным способом сращивания в связи с его экономичностью и эксплуатационными показателями, но требует научного обоснования выбора посадок в соединении шип-проушина. Целью исследования является обоснование диапазона посадок для соединений по длине на многократные прямоугольные шипы. Анализ существующих требований по выбору посадок в типовых соединениях показал, что стандарты регламентируют натяг в соединении шип-проушина от 0 до 0,3 мм, однако не все рекомендованные в учебно-справочной литературе посадки отвечают этому требованию. Расчет посадок проведен на основе трех методов: вероятностного, на максимум-минимум, на средний натяг. Для толщин шипа до 3 мм наиболее близки к требованиям ГОСТ 9330 и рекомендациям ранее проведенных исследований посадки H13/k13 и H13/za13 с натягами до +0,27 мм. Результаты работы могут быть использованы при планировании и проведении экспериментальных исследований прочности клеевых соединений на прямоугольные шипы.

Ключевые слова: склеивание древесины, прямоугольные шипы, прочность, посадка.

Сращивание древесины по длине наиболее часто производится на зубчатые шипы [3, с. 273; 18, с. 3]. Данная технология имеет ряд недостатков: дорогостоящий в изготовлении и обслуживании инструмент, необходимость удаления стружки, сниженная прочность соединений, связанная с затуплением вершин шипов. В качестве альтернативного варианта соединения может быть применено сращивание на прямоугольные прессованные шипы [8, с. 1]. При отсутствии указанных выше технологических проблем соединения на прямоугольные шипы показывают достаточный уровень прочности [9, с. 126].

Прямоугольные фрезерованные шипы применяются в основном в угловых концевых и ящичных соединениях. Для формирования рамок используют одинарный, двойной, реже тройной шип; для формирования коробок, ящичков – многократные прямоугольные шипы. Исследователями установлено, что существенное влияние на прочность угловых соединений на прямоугольные шипы оказывает тип посадки [6, с. 23; 12, с. 462; 11, с. 297]. В связи с этим разработан ряд рекомендаций по выбору посадок для соединений данного типа [7, с. 150; 11, с. 301; 17, с. 505].

Прямоугольные шипы для сращивания по длине предложено использовать в работах [16, с. 24; 1, с. 1; 20, с. 1; 2, с. 150; 8, с. 1]. Выявлено, что по показателям прочности и эстетичности наиболее предпочтительны шипы малых толщин, до 2-4 мм [9, с. 130]. Промышленное внедрение способа сращивания на прямоугольные прессованные шипы сдерживается отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору посадок в соединении шип-проушина и связанных с этим рекомендаций по параметрам и точности изготовления инструмента.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является обоснование диапазона посадок для соединений по длине на многократные прямоугольные шипы.

Задачи исследования:

- 1) анализ рекомендаций, приведенных в стандартах и научно-технической литературе, по выбору посадок в угловых концевых соединениях на прямоугольные шипы различных типов;
- 2) расчет посадок тремя методами: вероятностным, на максимум-минимум, по средним значениям зазора/натяга;
- 3) выработка рекомендаций по выбору посадок для клеевых соединений по длине на прямоугольные шипы малых толщин.

Ведущий подход. Объектом исследования являются клеевые соединения на прямоугольные шипы. Для обработки информации использовали эмпирико-теоретические методы, в частности, методы сравнения, обобщения, классификации, индукции и аналогии. Расчет зазоров и натягов проводили вероятностным методом, по методу максимума-минимума, по методу средних значений [10, с. 18].

Результаты исследований, их обсуждение. Вопросы, связанные с влиянием типа посадки на прочность клевого шипового соединения, рассмотрены в работах [6; 11, с. 297; 13, с. 209; 15, с. 1]. Установлено, что точность изготовления соединения и тип посадки по толщине шипа (ширине проушины) существенно влияют на его прочностные показатели [19, с. 493; 12, с. 462].

Рамные шипы рекомендуется изготавливать по 12–14 качеству [10, с. 22]. Для зубчатых шипов, используемых для сращивания по длине, установлен 13 квалитет точности изготовления [4, с. 2].

Многие исследователи при определении прочностных характеристик соединений на прямоугольные шипы принимают в качестве базовой посадку с зазором 0,02–0,05 мм [13, с. 209] и более [15, с. 1], с толщиной клевого шва 0,1 мм [14, с. 283]. В то же время результаты экспериментальных исследований [6, с. 258; 11, с. 301] позволили заключить, что посадки с натягом имеют ряд преимуществ перед традиционно используемыми посадками с зазором. Данные, полученные в работах [6, с. 255; 12, с. 465], показывают высокую степень корреляции между уменьшением зазора (увеличением натяга) в посадке и повышением прочности. Это может объясняться поверхностным уплотнением древесины в соединении и сниженной толщиной клевого слоя [11, с. 297]. Численное моделирование на основе метода конечных элементов [14, с. 283] подтверждает влияние снижения толщины клевого шва и связанной с этим величины зазора на повышение прочности соединений.

ГОСТ 9330 регламентирует натяг в шиповых соединениях от 0 до 0,3 мм [5, с. 12]. Для шипов толщиной 10 мм в работе [11, с. 301] предложен натяг 0,1–0,2 мм, в работе [6, с. 258] – 0,3 мм, для шипов толщиной 16 мм – 0,2 мм в работе [17, с. 505].

Вместе с тем в учебно-справочной литературе [7, с. 150; 10, с. 22], разработанной на основе РТМ 13-3300014-61-84 для применения при изготовлении угловых концевых и ящичных соединений, приводятся посадки по толщине шипа (ширине проушины) Н13/h13, Н13/js13, Н13/k13, Н13/za13. Расчет этих посадок по вероятностному методу (рис. 1) показал, что не все виды посадок и не для всех типовых толщин шипов отвечают требованиям ГОСТ 9330.

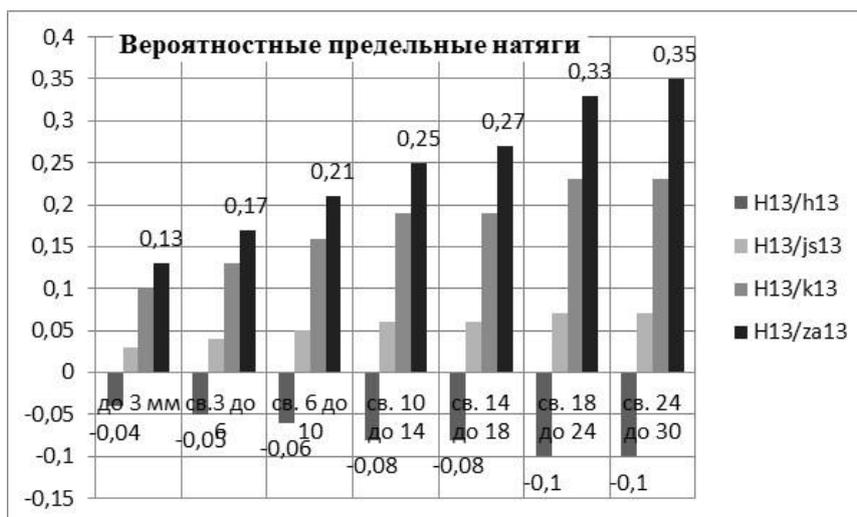


Рис. 1. Вероятностные предельные натяги для посадок Н13/h13, Н13/js13, Н13/k13, Н13/za13 в интервале размеров от 0 до 30 мм

Так, посадка Н13/h13 с величиной вероятностного предельного натяга, равной -0,04...-0,1 мм (т. е. зазору +0,04...+0,1 мм) для диапазона наиболее часто применяемых толщин шипов 0÷30 мм, не вписывается в регламентированный ГОСТ 9330 диапазон натягов от 0 до 0,3 мм. Посадка Н13/js13 с вероятностным предельным натягом от +0,03 до +0,07 мм в рассматриваемом диапазоне размеров соответствует ГОСТ 9330 лишь в части требований для твердых лиственных пород (от 0 до +0,2 мм) и не входит в диапазон натягов для соединений из хвойных и мягких лиственных пород (от +0,1 до +0,3 мм). Посадки Н13/k13 и Н13/za13 могут быть рекомендованы для большинства размеров из рассматриваемого диапазона, за исключением посадки Н13/za13 для размеров свыше 18 мм.

Для указанных посадок также проведены расчеты по методам максимума-минимума и средним значениям зазоров и натягов. Посадка Н13/js13 отвечает требованиям по величине максимального натяга в заготовках из хвойных пород в интервале размеров свыше 6 до 30 мм; посадка Н13/k13 – от 0 до 18 мм; посадка Н13/za13 – от 0 до 10 мм. Посадка Н13/za13 дает требуемый средний натяг в заготовках из хвойных пород в диапазоне размеров свыше 18 до 30 мм.

В таблице 1 приведены результаты анализа величин зазоров (натягов) в рекомендуемых посадках [7, с. 150] для размерного интервала наиболее часто применяемых толщин шипов 0–30 мм.

Таблица 1

Соответствие зазоров и натягов в посадках требованиям ГОСТ 9330*

Посадка	Метод расчета		
	вероятностный	на максимум-минимум	средние значения зазора/натяга
H13/h13	не соответствует	до 30 мм** до 30 мм**	не соответствует
H13/js13	до 30 мм не соответствует	до 30 мм свыше 6 до 30 мм	не соответствует
H13/k13	до 18 мм до 30 мм	до 6 мм до 18 мм	до 30 мм не соответствует
H13/za13	до 6 мм до 18 мм	до 3 мм до 10 мм	до 30 мм свыше 18 до 30 мм

* В числителе – значения для твердых лиственных пород, в знаменателе – для хвойных и мягких лиственных пород.

**При условии сочетания максимальной толщины шипа и минимальной ширины проушины.

Таким образом, в качестве предпочтительных посадок для прямоугольных шипов малых толщин до 3–10 мм в угловых соединениях можно отметить посадки H13/k13 и H13/za13 с натягами от 0 до +0,27 мм. По аналогии можно рекомендовать подобные посадки для соединений по длине на прямоугольные шипы, с их экспериментальным обоснованием. В задачи дальнейших исследований входит определение влияния типа посадки на прочностные свойства соединений по длине на прямоугольные прессованные шипы, с учетом точности, достигаемой при холодном торцовом прессовании шипов (11 квалитет).

Выводы:

1) Рекомендации по выбору посадок в угловых концевых соединениях на прямоугольные шипы, приведенные в учебно-справочной литературе, имеют расхождания с требованиями ГОСТ 9330 по обеспечению натяга от 0 до 0,3 мм и с заключениями по результатам проведенных ранее экспериментальных исследований по определению влияния величины натяга на прочность соединения. Представляется целесообразным уточнить требования в регламентирующих документах по величине натягов с учетом диапазона толщин шипа.

2) Расчет посадок тремя методами: вероятностным, на максимум-минимум, по средним значениям зазора/натяга показал, что посадка H13/h13 не соответствует требованиям стандарта, посадка H13/js13 ограничено применима в части исследуемого интервала толщин шипа, посадка H13/k13 в основном отвечает требованиям в части исследуемого интервала, посадка H13/za13 соответствует требованиям при малых толщинах шипа.

3) Наиболее близки к требованиям ГОСТ 9330 и рекомендациям ранее проведенных исследований посадки H13/k13 и H13/za13 с натягами до +0,27 мм. Посадки H13/k13 и H13/za13 обеспечивают требуемые расчетные натяги в заготовках из твердых лиственных пород для шипов толщиной до 3 мм. Расчеты посадок H13/k13 и H13/za13 для заготовок из хвойных и мягких лиственных пород по вероятностному методу и на максимум-минимум показали их применимость для шипов толщиной до 10 мм, однако метод средних значений не позволяет однозначно рекомендовать данные посадки. Результаты исследований требуют экспериментального подтверждения и могут быть использованы при планировании и проведении экспериментальных исследований прочности клеевых соединений на прямоугольные шипы.

Список литературы

1. Аюков С. Прочность сращивания на прямые ящичные шипы // Сергей Аюков. 2008. URL: <http://www.ayukov.com/woodworking/tips/box-joint-strength.html> (дата обращения: 25.12.18).
2. Барташевич А. А., Трофимов С. П. Конструирование мебели. Мн. : Современная школа, 2006. 336 с.
3. Волынский В. Н. Технология клееных материалов. СПб. : ПРОФИКС, 2008. 392 с.
4. ГОСТ 19414-90. Древесина клееная массивная. Общие требования к зубчатым клеевым соединениям. М. : Издательство стандартов, 1990. 7 с.
5. ГОСТ 9330-2016. Основные соединения деталей из древесины и древесных материалов. Типы и размеры. М. : Стандартинформ, 2017. 16 с.
6. Куликов И. В. Основы взаимозаменяемости и технические измерения в деревообработке. М. : Лесная пром-ть, 1966. 376 с.

7. Радчук Л. И. Основы конструирования изделий из древесины : учеб. пособие. М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. 200 с.
8. Рублева О. А. Способ формирования элементов шиповых соединений деревянных заготовок // Пат. 2741614 Рос. Федерация. № 2011116271/13; заявл. 25.04.2011 ; опубл. 10.01.2013, приоритет 25.04.11.
9. Рублева О. А. Формирование прямоугольных шипов способом торцового прессования // Лесотехнический журнал. 2013. № 4 (вып. 12). С. 126–133. DOI: 10.12737/2191.
10. Стотюк Ф. С. Технология изделий из древесины. Расчет допусков. Л. : ЛТА, 1986. 80 с.
11. Džinčić I., Živanić D. The influence of fit on the distribution of glue in oval tenon/mortise joint // Wood Research. 2014. Т. 59. №. 2. С. 297–302.
12. Effect of tenon geometry, grain orientation, and shoulder on bending moment capacity and moment rotation characteristics of mortise and tenon joints / Likos E at al. // Wood and Fiber Science. 2012. Т. 44. № 4. С. 462–469.
13. Erdil Y. Z., Kasal A., Eckelman C. A. Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints // Forest Products Journal. 2005. Т. 55. № 12. С. 209.
14. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams / Khelifa M. at al. // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2016. Т. 68. С. 283–297. DOI: 10.1016/j.jadhadh.2016.04.007.
15. Gawroński T., Smardzewski J. Rigidity-strength models and stress distribution in housed tenon joints subjected to torsion // Electronic Journal of Polish Agricultural Universities (EJPAU). 2006. Т. 9. №. 4. Ст. 32.
16. Guidice A. The Seven Essentials of Woodworking. Sterling, 2001. 128 p.
17. Hu W. G., Fu W. L., Guan H. Y. Optimal design of stretchers positions of mortise and tenon joint chair // Wood research. 2018. Т. 63. №. 3. С. 505–516.
18. Jokerst R. W. Finger-Jointed Wood Products. Forest Products Lab Madison Wi. № FSRP-FPL-382. 1981. 26 p.
19. Tankut N. The effect of adhesive type and bond line thickness on the strength of mortise and tenon joints // International journal of adhesion and adhesives. 2007. Т. 27. №. 6. С. 493–98. DOI: 10.1016/j.jadhadh.2006.07.003.
20. Wood connections with a finger joint // Free construction plans for home made scaffold furniture. URL: <https://homemade-furniture.com/woodworking-joints/finger-joint> (дата обращения: 25.12.18).

Fits in rectangular finger joints

O. A. Rubleva¹, A. G. Gorohovsky²

¹PhD of Technical Sciences, associate professor of the Department of machinery and woodworking technology, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: olga_ru@vyatsu.ru

²Doctor of Technical Sciences, deputy head of the Department of automation and innovative technologies, Ural State Forest Engineering University. Russia, Ekaterinburg. E-mail: goralegr@yandex.ru

Abstract. Gluing wood blanks along the length of rectangular spikes is a promising method of splicing due to its efficiency and performance, but requires scientific justification of the choice of fits in the mortise and tenon joint. The aim of the study is to substantiate the range of fits for connections along the length of multiple rectangular spikes. Analysis of the existing requirements for the choice of landings in standard connections showed that the standards regulate the overlap in the joint tenon-eye from 0 to 0.3 mm, but not all recommended in the reference literature fit meet this requirement. The calculation of fits was carried out on the basis of three methods: probabilistic, maximum-minimum, average tension. For stud thicknesses up to 3 mm fitting H13/k13 and H13/za13 with tightness up to +0.27 mm are closest to the requirements of GOST 9330 and the recommendations of previous studies. The results of the work can be used in planning and conducting experimental studies of the strength of adhesive joints on rectangular spikes.

Keywords: wood bonding, rectangular spikes, strength, fitting

References

1. Ayukov S. Prochnost' srashchivaniya na pryamye yashchichnye shipy [The strength of the splice box for direct spikes] // Sergey Ayukov. 2008. Available at: <http://www.ayukov.com/woodworking/tips/box-joint-strength.html> (date accessed: 25.12.18).
2. Bartashevich A. A., Trofimov S. P. Konstruirovaniye mebeli [Furniture design]. Mn. Sovremennaya shkola. 2006. 336 p.
3. Volynskiy V. N. Tekhnologiya kleenyykh materialov [Technology of glued materials]. SPb. Profix. 2008. 392 p.
4. GOST 19414-90. Solid glued wood. General requirements for toothed adhesive joints. M. Standards. 1990. 7 p. (in Russ.)
5. GOST 9330-2016. Basic connections of parts made of wood and wood materials. Types and sizes. M. Standartinform. 2017. 16 p. (in Russ.)
6. Kulikov I. V. Osnovy vzaimozamenyaemosti i tekhnicheskie izmereniya v derevoobrabotke [Basics of interchangeability and technical measurements in woodworking]. M. Lesnaya prom-t'. 1966. 376 p.
7. Radchuk L. I. Osnovy konstruirovaniya izdelij iz drevesiny : ucheb. posobie [Bases of designing of products from wood : tutorial]. M. State Educational Establishment of Higher Professional education MSUW. 2006. 200 p.
8. Rubleva O. A. Sposob formirovaniya elementov shipovykh soedinenij derevyannykh zagotovok [Method of forming elements of spike joints of wooden billets] // Pat. 2741614 Rus. Federation. No. 2011116271/13; publ. 25.04.2011; publ. 10.01.2013, priority 25.04.11.

9. Rubleva O. A. *Formirovanie pryamougol'nyh shipov sposobom torcovogo pressovaniya* [Formation of rectangular spikes by means of face pressing] // *Lesotekhnicheskij zhurnal* – Forest engineering journal. 2013. No. 4 (vol. 12). Pp. 126–133. DOI: 10.12737 / 2191.
10. Stovpyuk F. S. *Tekhnologiya izdelij iz drevesiny. Raschet dopuskov* [Technology of wood products. The calculation of tolerances]. L. LTA. 1986. 80 p.
11. Džinčić I., Živanić D. The influence of fit on the distribution of glue in oval tenon/mortise joint // *Wood Research*. 2014. Vol. 59. No. 2. Pp. 297–302.
12. Effect of tenon geometry, grain orientation, and shoulder on bending moment capacity and moment rotation characteristics of mortise and tenon joints / Likos E at al. // *Wood and Fiber Science*. 2012. Vol. 44. No. 4. Pp. 462–469.
13. Erdil Y. Z., Kasal A., Eckelman C. A. Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints // *Forest Products Journal*. 2005. Vol. 55. No 12. P. 209.
14. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams / Khelifa M. at al. // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016. Vol. 68. Pp. 283–297. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2016.04.007.
15. Gawroński T., Smardzewski J. Rigidity-strength models and stress distribution in housed tenon joints subjected to torsion // *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities (EJPAU)*. 2006. Vol. 9. No 4. Art. 32.
16. Guidice A. *The Seven Essentials of Woodworking*. Sterling, 2001. 128 p.
17. Hu W. G., Fu W. L., Guan H. Y. Optimal design of stretchers positions of mortise and tenon joint chair // *Wood research*. 2018. Vol. 63. No 3. Pp. 505–516.
18. Jokerst R. W. *Finger-Jointed Wood Products*. Forest Products Lab Madison Wi. No FSRP-FPL-382. 1981. 26 p.
19. Tankut N. The effect of adhesive type and bond line thickness on the strength of mortise and tenon joints // *International journal of adhesion and adhesives*. 2007. Vol. 27. No 6. Pp. 493–98. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2006.07.003.
20. Wood connections with a finger joint // *Free construction plans for home made scaffold furniture*. Available at: <https://homemade-furniture.com/woodworking-joints/finger-joint> (date accessed: 25.12.18).

Моделирование статической реакции балки на нелинейно упругом основании

В. М. Шишкин

доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и строительной механики, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: tism1@rambler.ru

Аннотация. Разработана конечно-элементная методика моделирования статической реакции произвольно нагруженных балок, лежащих на нелинейно упругом винклеровском основании, с использованием балочного конечного элемента, работающего в рамках классических гипотез Кирхгофа-Лява. Для получения уравнений равновесия конечного элемента используется принцип возможных перемещений. Построена мгновенная матрица жесткости конечного элемента балки на нелинейно упругом основании, зависящая от текущего прогиба центра элемента. Получена система квазилинейных разрешающих уравнений для определения статической реакции балки на нелинейно упругом основании. Предложен быстро сходящийся итерационный алгоритм решения полученной системы уравнений. Разработана универсальная программа определения напряженно-деформированного состояния балок на нелинейно упругом основании на встроенном языке программирования пакета компьютерной математики MATLAB. Проведены численные эксперименты, подтверждающие достоверность разработанной конечно-элементной методики.

Ключевые слова: балка, упругое основание, конечный элемент, итерационный алгоритм.

Балки на упругом основании широко применяются в современных инженерных конструкциях различного назначения. Классификация данных балок включает как принимаемые условно за бесконечно длинные балки типа сварных рельсов, так и балки конечной длины. В строительстве расчет многих типов фундаментов сводится к расчету балок на упругом основании. В транспортном строительстве к таким конструкциям относятся, например, водопропускные трубы, подводные тоннели на стадии их эксплуатации, а также различные виды трубопроводов. При расчете балок на упругом основании обычно считается, что погонная реакция основания $R(w)$ линейно зависит от прогиба балки w [1; 2]. Однако в некоторых случаях, например, при определении реакции грунта в случае больших деформаций, такая зависимость может быть нелинейной. Имеющие аналитические методы расчета балок на нелинейно упругом основании ограничиваются рамками каких-либо частных случаев нагружения и только определенными видами зависимости $R(w)$.

Предлагается общий подход к расчету балок на нелинейном упругом основании, состоящий на применении метода конечных элементов (МКЭ) и итерационных методов решения получаемых при этом систем разрешающих уравнений, свободный от каких-либо ограничений на характер зависимости $R(w)$ и условий нагружения балки. На рис. 1 представлен балочный конечный элемент, лежащий на упругом основании. Считается, что упругое основание является винклеровским, т. е. любая часть основания работает независимо от других частей. На элемент действует распределенная нагрузка $q(x)$. Узловые перемещения элемента определяются вектором $\{r^{(e)}\} = \{w_1 \ \varphi_1 \ w_2 \ \varphi_2\}$, где $w_1, w_2, \varphi_1, \varphi_2$ – прогибы и углы поворота его узлов. Элемент работает в рамках классических гипотез Кирхгофа-Лява [3]. Жесткость EI элемента при изгибе в пределах его длины l считается постоянной.

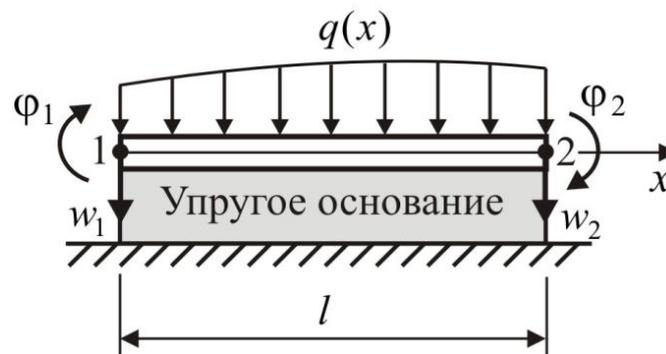


Рис. 1. Балочный конечный элемент на упругом основании

Аппроксимируем прогиб w в пределах элемента зависимостью

$$w = \{N\}^T \{r^{(e)}\}, \quad (1)$$

где $\{N\} = \{N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4\}$ – базисные функции:

$$N_1 = 1 - \frac{3x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3}; \quad N_2 = x - \frac{2x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2};$$

$$N_3 = \frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3}; \quad N_4 = -\frac{x^2}{l} + \frac{x^3}{l^2}.$$

Для получения уравнений равновесия конечного элемента воспользуемся принципом возможных перемещений:

$$\delta A = \delta A_M + \delta A_q + \delta A_R = 0. \quad (2)$$

Здесь δA_M , δA_q , δA_R – соответственно возможная работа изгибающих моментов M , нагрузки $q(x)$ и погонной реакции основания $R(w)$ в деформированном состоянии элемента. Величина δA_M определяется выражением

$$\delta A_M = -\int_0^l \delta \chi M dx, \quad (3)$$

где χ – кривизна оси в произвольном сечении элемента. Далее воспользуемся известными зависимостями

$$\chi = w'', \quad M = EI\chi.$$

Подставляя сюда аппроксимацию (1), получаем

$$\chi = \{N''\}^T \{r^{(e)}\}, \quad M = EI\{N''\}^T \{r^{(e)}\}.$$

С учетом этого выражение (3) принимает вид

$$\delta A_M = -\{\delta r^{(e)}\}^T \int_0^l \{N''\} \{N''\}^T dx \{r^{(e)}\}$$

или

$$\delta A_M = -\{\delta r^{(e)}\}^T [K^{(e)}] \{r^{(e)}\}, \quad (4)$$

где

$$[K^{(e)}] = EI \int_0^l \{N''\} \{N''\}^T dx = EI \begin{bmatrix} 12/l^3 & 6/l^2 & -12/l^3 & 6/l^2 \\ 6/l^2 & 4/l & -6/l^2 & 2/l \\ -12/l^3 & -6/l^2 & 12/l^3 & -6/l^2 \\ 6/l^2 & 2/l & -6/l^2 & 4/l \end{bmatrix} \quad \text{– матрица жесткости}$$

элемента балки.

Найдем возможную работу нагрузки $q(x)$:

$$\delta A_q = \int_0^l \delta w q(x) dx.$$

С учетом аппроксимации (1) получаем

$$\delta A_q = \{\delta r^{(e)}\}^T \int_0^l \{N\} q(x) dx. \quad (5)$$

Будем считать, что нагрузка $q(x)$ распределена в пределах элемента по линейному закону:

$$q(x) = \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix}; \quad H_1 = 1 - \frac{x}{l}; \quad H_2 = \frac{x}{l}.$$

Здесь q_1 , q_2 – значения $q(x)$ в узлах 1, 2 элемента. С учетом этого выражение (5) можно привести к виду

$$\delta A_q = \{\delta r^{(e)}\}^T \{P^{(e)}\}, \tag{6}$$

где

$$\{P^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ m_1 \\ P_2 \\ m_2 \end{Bmatrix} = \int_0^l \{N\} \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{Bmatrix}^T dx \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \frac{l}{60} \begin{bmatrix} 21 & 9 \\ 3l & 2l \\ 9 & 21 \\ -2l & -3l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} - \text{вектор внешних узловых}$$

сил элемента от нагрузки $q(x)$.

Найдем возможную работу погонной реакции основания $R(w)$:

$$\delta A_R = - \int_0^l \delta w R(w) dx.$$

Подставляя сюда аппроксимацию (1), получаем

$$\delta A_R = - \{\delta r^{(e)}\}^T \int_0^l \{N\} R(w) dx.$$

Введем величину $\tilde{R}(w) = R(w)/w$. С учетом этого и аппроксимации (1) последнее выражение можно представить в виде

$$\delta A_R = - \{\delta r^{(e)}\}^T \int_0^l \tilde{R}(w) \{N\} \{N\}^T dx \{r^{(e)}\}. \tag{7}$$

Для балки на нелинейно упругом основании величина $\tilde{R}(w)$ в пределах элемента нелинейно зависит от прогиба w , а он по кубическому зависит от координаты x произвольной точки элемента и определяется его узловыми перемещениями $\{r^{(e)}\}$. Поэтому вопрос вычисления определенного интеграла в (7) является проблематичным. Чтобы обойти эту трудность, будем считать, что величина $\tilde{R}(w)$ в пределах элемента постоянна и равна ее значению $\tilde{R}(w_c) = R(w_c)/w_c$ в середине элемента. Прогиб w_c вычисляется на основании (1) при $x = l/2$:

$$w_c = \{N(l/2)\}^T \{r^{(e)}\} = \{1/2 \quad l/8 \quad 1/2 \quad -l/8\}^T \{r^{(e)}\}.$$

Тогда вместо (7) можно записать

$$\delta A_R = - \{\delta r^{(e)}\}^T \tilde{R}(w_c) \int_0^l \{N\} \{N\}^T dx \{\delta r^{(e)}\}.$$

Последнее выражение можно привести к виду

$$\delta A_R = - \{\delta r^{(e)}\}^T [\tilde{K}^{(e)}] \{r^{(e)}\}, \tag{8}$$

где

$$[\tilde{K}^{(e)}] = \tilde{R}(w_c) \int_0^l \{N\} \{N\}^T dx = \tilde{R}(w_c) \begin{bmatrix} 13l/35 & 11l^2/210 & 9l/70 & -13l^2/420 \\ 11l^2/210 & l^3/105 & 13l^2/420 & -l^3/140 \\ 9l/70 & 13l^2/420 & 13l/35 & -11l^2/210 \\ -13l^2/420 & -l^3/140 & -11l^2/210 & l^3/105 \end{bmatrix} -$$

мгновенная матрица жесткости элемента нелинейно упругого основания, зависящая от текущего прогиба w_c (если основание оказывает сопротивление изгибу балки только в области положительных значений w , т. е. является односторонним, то при $w_c \leq 0$ матрица $[\tilde{K}^{(e)}]$ считается нулевой).

Подставляя (4), (6) и (8) в уравнение (2), получаем

$$- \{\delta r^{(e)}\}^T [K^{(e)}] \{r^{(e)}\} + \{\delta r^{(e)}\}^T \{P^{(e)}\} - \{\delta r^{(e)}\}^T [\tilde{K}^{(e)}] \{r^{(e)}\} = 0.$$

Отсюда при условии $\{\delta r^{(e)}\} \neq 0$ и независимости компонент вектора $\{r^{(e)}\}$ следуют уравнения равновесия конечного элемента

$$([K^{(e)}] + [\tilde{K}^{(e)}])\{r^{(e)}\} = \{P^{(e)}\}.$$

Объединяя данные уравнения по направлениям общих для смежных элементов узловых перемещений, получаем систему разрешающих уравнений

$$([K] + [\tilde{K}])\{r\} = \{P\}, \quad (9)$$

где $[K]$, $[\tilde{K}]$, $\{r\}$, $\{P\}$ – соответственно матрица жесткости конечно-элементной модели балки, мгновенная матрица жесткости нелинейно упругого основания, вектор узловых перемещений и вектор внешних узловых сил (вектор нагрузки) отмеченной модели.

Необходимо заметить, что матрица $[\tilde{K}]$ зависит от прогибов центров конечных элементов, которые на момент формирования системы (9) еще неизвестны. Поэтому данную систему необходимо решать методом последовательных приближений. Для этого можно рекомендовать итерационный алгоритм

$$([K] + [\tilde{K}]_i)\{r\}_{i+1} = \{P\}, \quad (10)$$

где i – номер текущей итерации. Алгоритм стартует при значении $i = 0$ и некотором ненулевом начальном векторе $\{r\}_0$, при котором формируется матрица $[\tilde{K}]_0$. Затем из системы (10) находят узловые перемещения $\{r\}_1$, при которых формируется матрица $[\tilde{K}]_1$, затем снова решается система (10) и т. д. Итерации продолжаются до выполнения условия

$$D = \frac{\|\{r\}_{i+1} - \{r\}_i\|_2^2}{\|\{r\}_{i+1}\|_2^2} \leq \varepsilon, \quad (11)$$

где $\|\{r\}_{i+1} - \{r\}_i\|_2^2$, $\|\{r\}_{i+1}\|_2^2$ – квадраты вторых норм соответствующих векторов [3], ε – заданная точность.

В качестве примера рассматривается балка на сплошном нелинейно упругом основании (рис. 2) при действии погонной нагрузки $q = 1,4$ кН/м и сосредоточенных сил $P_1 = 7,2$ кН, $P_2 = 17,5$ кН, приложенных на расстояниях $x_1 = 1,78$ м и $x_2 = 4,89$ м от левого конца балки. Длина балки $L = 8$ м, жесткость на изгиб $EI = 28500 \cdot 10^3$ кН·м². Погонная реакция упругого основания зависит от прогиба w по закону $R(w) = 72w + 3425w^2$ кН/м (прогиб w задается в метрах). Балка моделируется 72 элементами одинаковой длины.

Система (9) решалась методом последовательных приближений с использованием описанного выше итерационного алгоритма (10) при точности $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-9}$. В качестве начального приближения использовался единичный вектор $\{r\}_0$. Для достижения заданной точности потребовалось 22 итерации.

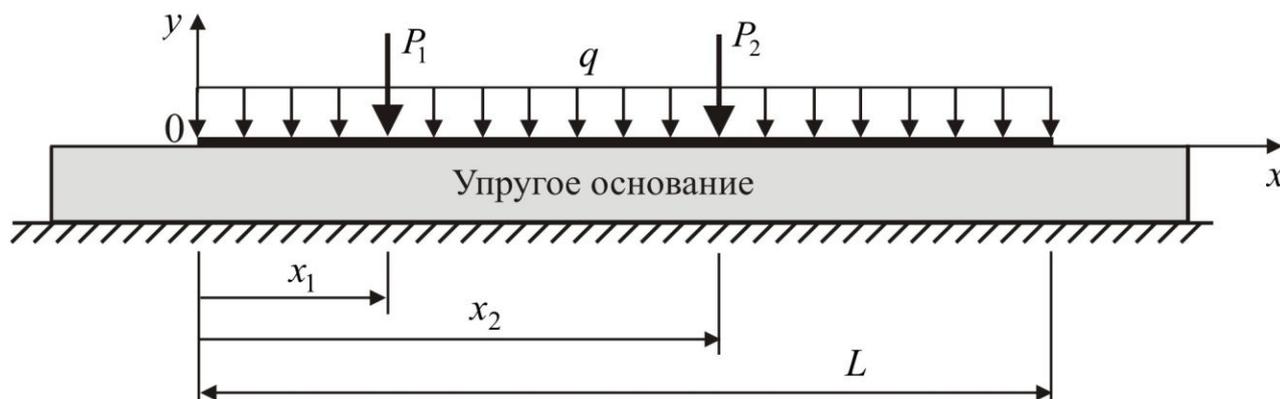
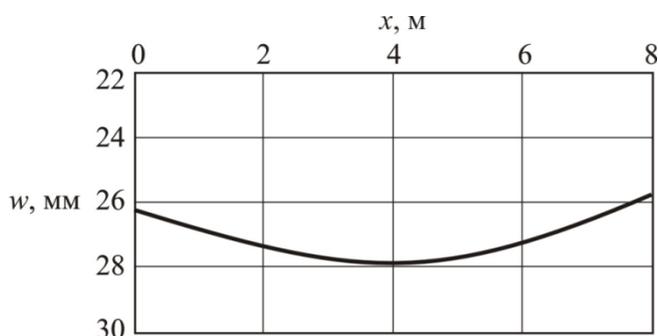
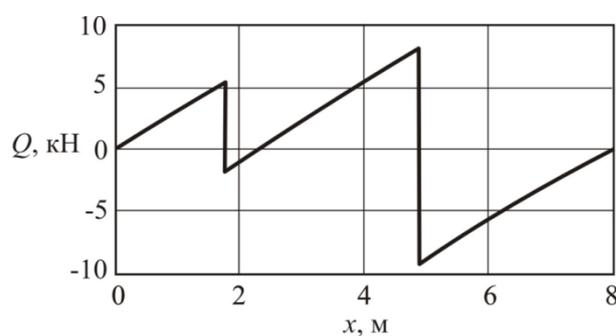
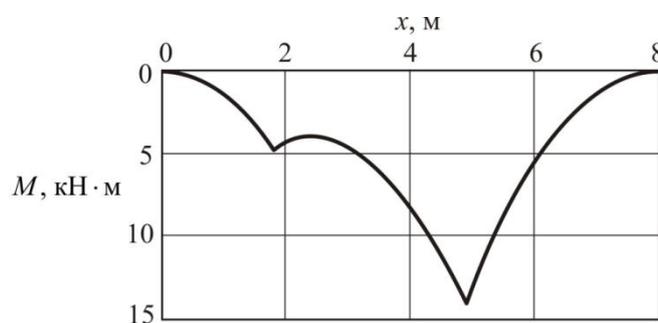
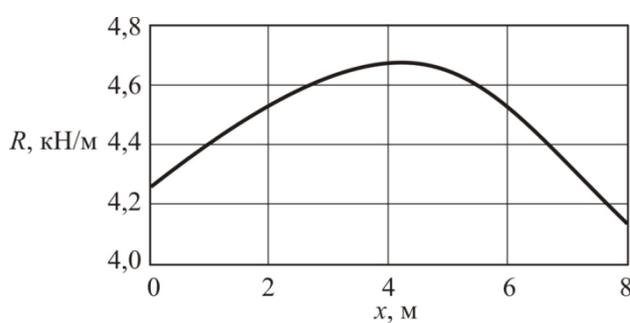


Рис. 2. Расчетная схема балки

На рис. 3–6 представлены эпюры прогибов w , поперечных сил Q , изгибающих моментов M и погонной реакции основания R . С целью оценки достоверности полученных результатов проведена проверка равновесия балки, которая сходится с высокой степенью точности:

$$\sum Y = 8,131 \cdot 10^{-5} \text{ кН}; \quad \sum M_0 = 2,735 \cdot 10^{-4} \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Рис. 3. Эпюра w Рис. 4. Эпюра Q Рис. 5. Эпюра M Рис. 6. Эпюра R

Разработанная методика конечно-элементного анализа статической реакции балки на нелинейно упругом основании может использоваться при изучении дисциплины «Нелинейные методы строительной механики» при подготовке магистров по направлению «Строительство» в рамках образовательной программы «Расчет и конструирование зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения».

Список литературы

1. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. Л. Расчет конструкций на упругом основании. М. : Стройиздат, 1973. 628 с.
2. Симвулиди И. Д. Расчет инженерных конструкций на упругом основании. М. : Высшая школа, 1973. 431 с.
3. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. М. : Мир, 1982. 238 с.

Modeling static response of a beam on a nonlinear elastic base

V. M. Shishkin

Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of theoretical and structural mechanics,
Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: tism1@rambler.ru

Abstract. A finite element method for modeling the static reaction of arbitrarily loaded beams lying on a non-linearly elastic Winkler base has been developed using a beam finite element operating within the framework of the classical Kirghoff-Lyav hypotheses. To obtain the equilibrium equations of a finite element, the principle of possible displacements is used. An instantaneous stiffness matrix of a finite element of a beam on a non-linearly elastic base is constructed, depending on the current deflection of the center of the element. A system of quasi-linear resolving equations is obtained for determining the static reaction of a beam on a nonlinear elastic base. A fast converging iterative algorithm for solving the resulting system of equations is proposed. A universal program for determining the stress-strain state of beams on a nonlinear elastic base has been developed using the built-in programming language of the MATLAB computer mathematics package. Numerical experiments were carried out to confirm the validity of the developed finite element method.

Keywords: beam; elastic base; finite element; iterative algorithm.

References

1. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. L. *Raschet konstrukcij na uprugom osnovanii* [Calculation of structures on an elastic base]. M. Stroizdat. 1973. 628 p.
2. Simvulidi I. D. *Raschet inzhenernyh konstrukcij na uprugom osnovanii* [Calculation of engineering structures on elastic foundation]. M. Vyssh. shkola. 1973. 431 p.
3. Shoup T. *Reshenie inzhenernyh zadach na EVM* [Solution of engineering problems on a computer]. M. Mir. 1982. 238 p.

Особенности разработки компьютерной модели экологического паспорта микрорайона «Квартал 119»

Т. А. Мусихина¹, В. Ю. Мельцов², И. А. Родыгин³, О. О. Ходырева⁴

¹кандидат географических наук, заведующий кафедрой промышленной и прикладной экологии, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: usr04011@vyatsu.ru

²кандидат технических наук, доцент кафедры электронных вычислительных машин, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: meltsov@vyatsu.ru

³студент кафедры электронных вычислительных машин, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: usr21488@vyatsu.ru

⁴студентка 3 курса ИнХимЭк, Вятский государственный университет. Россия, г. Киров

Аннотация. В работе представлены результаты первого этапа проектирования компьютерной модели экологического паспорта территории «Квартал 119». Для построения модели был использован метод моделирования на основе DFD-диаграмм, представляющий собой иерархию функциональных процессов, связанных потоками данных. Контентом для созданного электронного продукта послужили результаты экологических исследований в «Квартале 119» в рамках стратегического проекта Вятского государственного университета. Для этого была проведена разработка и сбор данных для создания системы раздельного сбора твердых бытовых отходов. В рамках работы исследовались прямые и косвенные факторы окружающей среды, в том числе воздействие промышленных объектов, автотранспорта, объектов социнфраструктуры и отходов жизнедеятельности населения. Созданная модель позволяет визуализировать различные по форме результаты проводимых исследований, своевременно размещать динамически меняющуюся информацию с привязкой к местности.

Ключевые слова: благоприятная окружающая среда, компьютерная модель, DFD-диаграмма, экологический паспорт.

В рамках стратегического проекта Вятского государственного университета «Квартал 119» была поставлена задача разработки экологического паспорта микрорайона города Кирова и проведения исследований для создания системы раздельного сбора твердых бытовых отходов на этой территории. Результаты специальных экологических работ в «Квартале 119» послужили контентом для создания компьютерной модели с использованием ГИС-технологий [3, с. 8]. Создание компьютерной модели экологического паспорта базируется на технологии размещения географических объектов поисково-информационной картографической службы «Яндекс.Карты» [6]. Визуализация модели позволяет комплексно анализировать результаты различного рода экологических исследований, представленных в разнообразных формах [8, с. 512].

Цель исследования. Используя ГИС-технологии, разработать форматы представления экологических данных и способ визуализации различного вида информации с возможностью в интерактивном режиме пополнять, корректировать и комплексно анализировать экологическую ситуацию в микрорайоне «Квартал 119», ориентированную в пространстве и во времени.

Задачи исследования. Поскольку при создании экологического паспорта микрорайона возникла необходимость выйти за рамки ГОСТ Р 17.0.0.06–2000 «Экологический паспорт природопользователя. Основные положения. Типовые формы» [2], то потребовалась разработка новой, более информативной и удобной интерактивной формы паспорта с использованием современных компьютерных технологий. Для этого должна быть формализована информационная база и проведена соответствующая сортировка для визуализации данных в виде: текстовых материалов; тематических карт; различных таблиц с результатами проб (для некоторых из них должна быть осуществлена привязка к картографическому материалу) и т. д. [7, с. 1]. Должны быть определены основные этапы структурного анализа и принципы проектирования компьютерной модели на основе диаграмм потоков данных (DFD). Обязательными условиями являются разработка программного интерфейса приложения (API) с учетом современных веб-технологий, используемых в ВятГУ, разработка слоев для геоинформационной системы, выбор среды разработки и средств, позволяющих подключить разрабатываемое ПО к официальному сайту ВятГУ [5, с. 16].

Ведущий подход. Набор выбранных экологических показателей был приближен к понятию о благоприятной окружающей среде для жителей городов, поэтому потребовалось использование новых подходов к комплексной экологической оценке микрорайона, что, в свою очередь, потребовало создания компьютерной модели [1, с. 12].

В качестве первого этапа разработки можно выделить этап выбора жизненного цикла программного обеспечения. Поскольку все требования к электронной модели «Экологический паспорт микрорайона “Квартал 119”» были сформированы достаточно полно и точно, была выбрана кас-

кадная модель жизненного цикла. Основными достоинствами выбранного подхода являются простота применения, определенность и понятность шагов проектирования, а также стабильность требований в течение всего жизненного цикла разработки.

Для построения модели был использован метод моделирования на основе DFD-диаграмм, представляющий собой иерархию функциональных процессов, связанных потоками данных [4, с. 36]. Цель моделирования – определить, как каждый процесс преобразует свои входные данные в выходные, и выявить отношения между этими процессами. Наиболее важными процессами являются процесс построения картографических слоев и процесс работы менеджера геообъектов. Последний позволяет добавлять на карту большое количество объектов без потери производительности системы. Процесс построения картографических слоев может быть разделен на отдельные подзадачи:

- прорисовка отдельных линий по координатам из файла;
- заливка цветом внутри многоугольников;
- создание всплывающих подсказок;
- загрузка данных во всплывающие подсказки из файла;
- создание подсказок, отображаемых при наведении мышки;
- загрузка данных в подсказки, отображаемые при наведении мышью из файла.

На рис. 1 приведена DFD-диаграмма процесса построения картографических слоев.

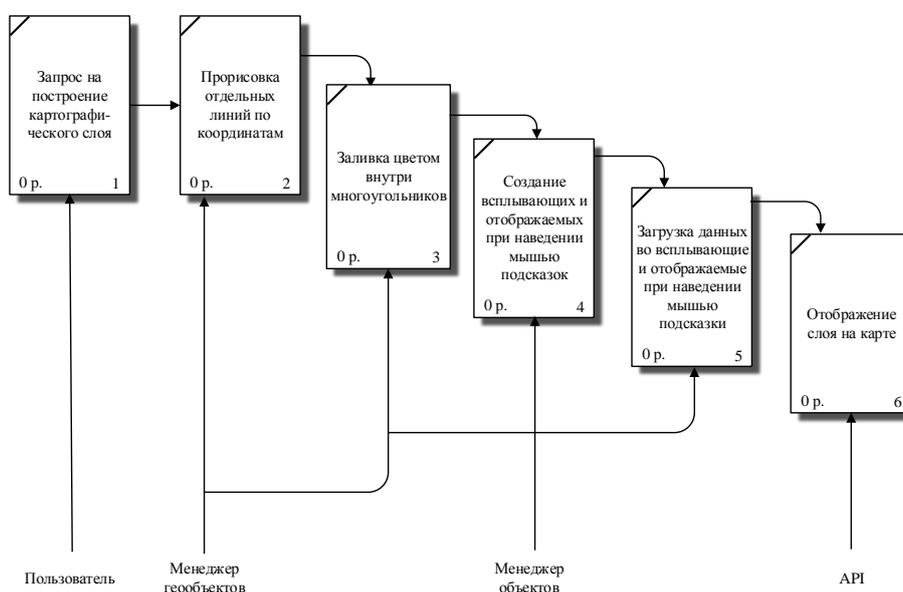


Рис. 1. DFD-диаграмма построения картографических слоев

За создание и удаление объектов на карте отвечает менеджер геообъектов, DFD-диаграмма работы которого представлена на рис. 2.

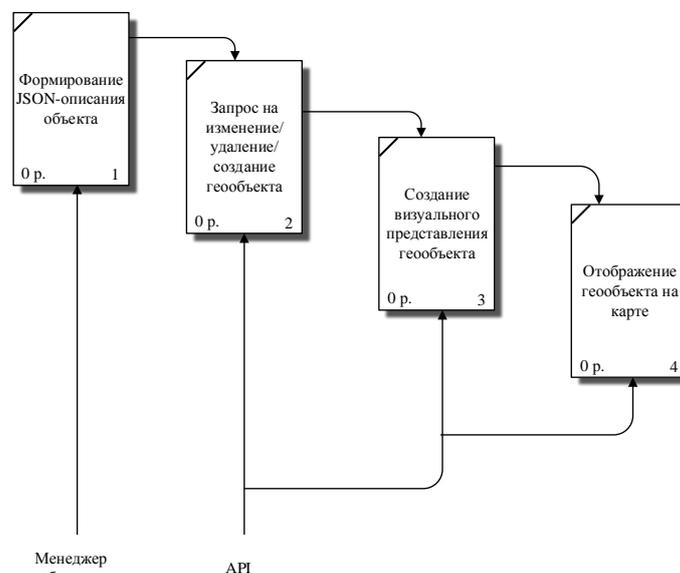


Рис. 2. DFD-диаграмма работы менеджера геообъектов

В качестве основной среды проектирования была выбрана IDE «WebStorm», поддерживающая язык программирования JavaScript, а также стандартизированный язык разметки HTML и формальный язык описания внешнего вида CSS. Выбор языка программирования JavaScript обусловлен тем, что API геообъектов сервиса «Яндекс.Карты» поддерживает только его.

Главной причиной выбора использования API сервиса «Яндекс.Карты» является его корректная работа во всех актуальных для пользователя браузерах и адаптивный интерфейс [5, с. 53]. Однако стоит отметить также встроенный менеджер геообъектов, позволяющий быстро производить необходимые изменения с объектами на карте.

Пользователь имеет следующие возможности использования сервиса в интерактивном режиме:

- выбор отображения необходимых слоев в зависимости от выставленных отметок в полях раздела «Слой»;
- выбор отображения различных типов мусорных баков в зависимости от выставленных отметок в полях раздела «Мусорные баки»;
- выбор отображения проб снега и почвы;
- вывод выбранных объектов на карту в зависимости от пользовательских установок путем нажатия на кнопку «Отобразить»;
- полное очищение карты при чрезмерном ее заполнении различными геообъектами;
- изменение масштаба карты;
- изменение типа главного слоя всей карты (схема, спутник или гибрид);
- вызов всплывающей подсказки путем нажатия на геообъект;
- вызов короткой подсказки путем наведения на геообъект.

Основная экранная форма компьютерной модели «Квартала 119» представлена на рис. 3.

Для добавления и изменения отображаемой информации достаточно занести необходимые данные в соответствующий файл, сохранить изменения и обновить страницу в браузере.

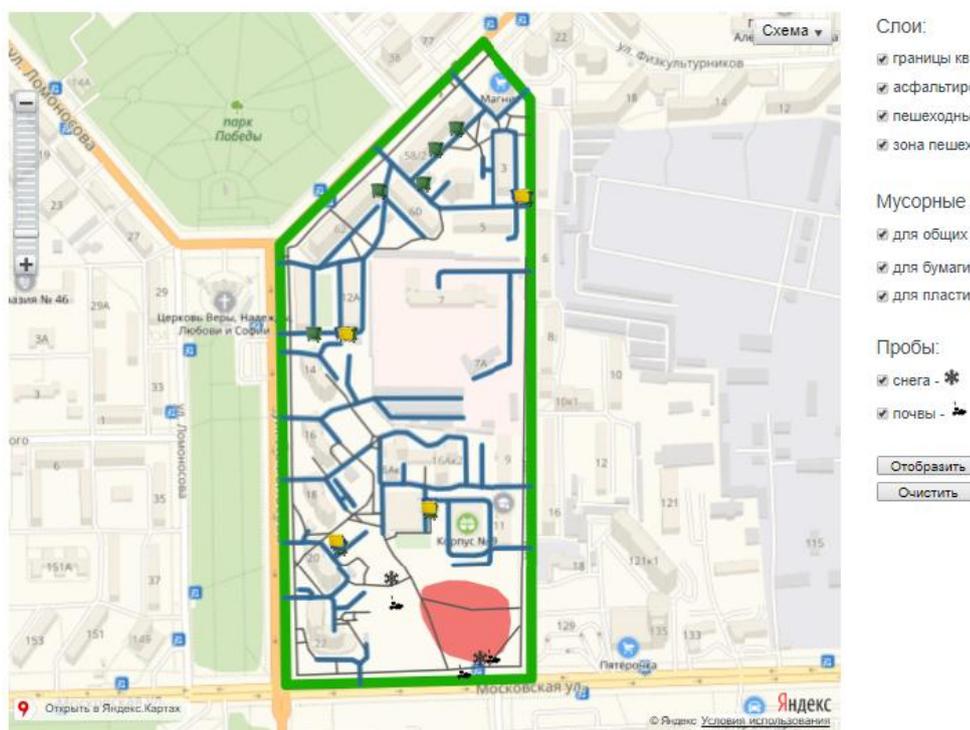


Рис. 3. Экранная форма модели «Квартала 119»

При определении контента (информационной базы) модели использовались следующие способы получения данных: социологический опрос среди студентов и проживающего в квартале населения, визуальные осмотры контейнерных площадок, расчеты количества и массы выброса от проезжающего автотранспорта, химико-аналитические исследования почв, снега, атмосферного воздуха по специально составленным программам, в соответствии с сезонностью и привязкам к определенным точкам отбора, уточнение границы зон антропогенного воздействия с учетом имеющегося картографического материала и т. п.

Результаты исследования, их обсуждение. Все разделы паспорта, в том числе по качеству природных компонентов, пополняются в интерактивном режиме, что обеспечивается за счет загрузки данных из файла, позволяя быстро вносить необходимые изменения и корректировки. К основным результатам выполненного этапа проектного исследования можно отнести следующие:

– созданная модель позволяет визуализировать различные по форме результаты проводимых исследований, своевременно размещать динамически меняющуюся информацию с привязкой к местности;

– территория городского квартала может быть рассмотрена как новая единица для экологического районирования урбанизированных территорий.

Набор современных средств, методологий и технологий программирования интенсивно развивается. Управление жизненным циклом программного продукта становится необходимым элементом разработки интеллектуальных информационных систем. Выбор каскадной модели системы упрощает процесс проектирования, документирования и развития программного продукта. Построенная функциональная модель объекта может в дальнейшем конвертироваться с помощью определенных CASE-средств в UML-диаграммы для последующего построения на их основе программного кода геоинформационной системы «Экологический паспорт микрорайона “Квартал 119”».

Список литературы

1. Боев В. Д., Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование. ИНТУИТ.РУ, 2010. 349 с.
2. ГОСТ Р 17.0.0.06-2000 Охрана природы. Экологический паспорт природопользователя. Прин. 11.09.2000; действ. с 11.09.2000. М. : Госстандарт России, 2001.
3. Журкин И. Г., Шайтура С. В. Геоинформационные системы. М. : Кудиц-пресс, 2009. 272 с.
4. Камаев В. А., Костерин В. В. Технологии программирования – новый учебник // Современные проблемы науки и образования. 2005. № 2. С. 37–42.
5. Литвиненко Н. А. Технология программирования на С++. Win32 API-приложения. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 288 с.
6. Майер Р. В. Компьютерное моделирование: моделирование как метод научного познания // Научный электронный архив. URL: <http://econfrae.ru/article/6722> (дата обращения: 12.11.2018).
7. Dolzhenkova M. L., Meltsov V. Y., Strabykin D. A. Method of Consequences Inference From New Facts In Case Of An Incomplete Knowledge Base // Indian Journal Of Science And Technology. Vol. 9. Is. 39. October 2016. P. 100413.
8. Meltsov V. Yu., Chistyakov G. A. Development modules for specification of requirements for a system of verification of parallel algorithms // European researcher. Series A. 2012. № 5-1 (20). P. 511–514.

Features of development of the computer model of the ecological passport of the residential district "Kvartal 119"

T. A. Musihina¹, V. Yu. Meltsov², I. A. Rodygin³, O. O. Hodyreva⁴

¹PhD of Geographical Sciences, head of the Department of industrial and applied ecology, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: usr04011@vyatsu.ru

²PhD of Technical Sciences, associate professor of the Department of electronic computers, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: meltsov@vyatsu.ru

³student of the Department of electronic computers, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: usr21488@vyatsu.ru

⁴student of the Institut of chemistry and ecology, Vyatka State University. Russia, Kirov.

Abstract. The paper presents the results of the first stage of designing a computer model of the ecological passport of the territory of district "Kvartal 119". To build the model, we used a simulation method based on DFD diagrams, which is a hierarchy of functional processes associated with data flows. The content for the created electronic product was the results of environmental studies in the "Quarter 119" within the framework of the strategic project of Vyatka State University. For this purpose, data were developed and collected to create a system for separate collection of solid waste. The work investigated direct and indirect environmental factors, including the impact of industrial facilities, vehicles, social infrastructure facilities and waste of the population. The created model allows you to visualize the results of various forms of research, timely place dynamically changing information with reference to the terrain.

Keywords: favorable environment, computer model, DFD diagram, environmental passport.

References

1. Boev V. D., Sympchenko R. P. *Komp'yuternoe modelirovanie* [Computer modeling]. INTUIT.RU. 2010. 349 p.
2. GOST R 17.0.0.06-2000 Protection of nature. Environmental passport of the nature user. Prin. 11.09.2000; act. since 11.09.2000. M. Gosstandart of Russia. 2001. (in Russ.)

3. Zhurkin I. G., Shajtura S. V. *Geoinformacionnye sistemy* [Geoinformation systems]. M. Kudic-press. 2009. 272 p.
4. Kamaev V. A., Kosterin V. V. *Tekhnologii programirovaniya – novyj uchebnik* [Programming technologies – a new textbook] // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* – Modern problems of science and education. 2005. No. 2. Pp. 37–42.
5. Litvinenko N. A. *Tekhnologiya programirovaniya na S++. Win32 API-prilozheniya* [Programming technology in C++. Win32 API applications]. SPb. BHV-Petersburg. 2010. 288 p.
6. Mayer R. V. *Komp'yuternoe modelirovanie: modelirovanie kak metod nauchnogo poznaniya* [Computer modeling: modeling as a method of scientific knowledge] // *Nauchnyj elektronnyj arhiv* – Scientific electronic archive. Available at: <http://econf.rae.ru/article /6722> (date accessed: 12.11.2018).
7. Dolzhenkova M. L., Meltsov V. Y., Strabykin D. A. Method of Consequences Inference From New Facts In Case Of An Incomplete Knowledge Base // *Indian Journal Of Science And Technology*. Vol. 9. Is. 39. October 2016. P.100413.
8. Meltsov V. Yu., Chistyakov G. A. Development modules for specification of requirements for a system of verification of parallel algorithms // *European researcher. Series A*. 2012. № 5-1 (20). Pp. 511–514.

Advanced science

Научный журнал № 4 (15) (2019)

16+

Вятский государственный университет,
610000, г. Киров, ул. Московская, 36
(8332) 208-964