

УДК 620.17

## ОЦЕНКА СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КАБЕЛЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ ИЗГИБА

Г.М. Исмаилов, В.М. Мусалимов\*, В.Д. Шиянов\*\*, С.В. Лутовинов\*\*

Томский государственный педагогический университет

\*Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики

\*\*ОГОУ СПО «Томский индустриальный техникум»

E-mail: gmismailov@rambler.ru

*Рассмотрены вопросы оценки силового взаимодействия элементов кабельных конструкций при деформациях изгиба. Предложены способ и устройство, его реализующее, для определения силы и коэффициента трения отдельных элементов кабельных изделий.*

### **Ключевые слова:**

*Фрикционное взаимодействие, трибологические характеристики, сдвиги, токопроводящая жила, шаг скрутки кабеля.*

### **Key words:**

*Friction interaction, tribology characteristics, displacements, current thread, cable torsion spacing.*

Гибкие кабели эксплуатируются в сложных условиях, претерпевая различные виды деформации в зависимости от характера работ подвижных механизмов. В отличие от кабелей стационарной прокладки они подвергаются циклическим деформациям растяжения-сжатия, кручения, изгиба и изгиба с кручением. Одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик гибких кабелей является их стойкость при многократных деформациях, которая является оценкой их долговечности. Так как гибкий кабель это сложная механическая конструкция, представляет интерес исследование силового взаимодействия элементов конструкции кабеля при циклических деформациях с учетом перемещения отдельных элементов, например, при изгибе. Определяя значения сдвигов отдельных элементов по известным формулам [1], и касательных напряжений по поверхности контакта экспериментальным путем можно найти параметры силового фрикционного взаимодействия элементов конструкции гибкого кабеля.

Шланговую оболочку кабеля можно представить как непрерывную матрицу с заполнениями междужильного пространства, а спиральные элементы — как армирующие волокна. Тогда кабельная конструкция получается, в определенной степени, аналогичной композитной. Такой подход позволяет применять опыт изучения композитных материалов к исследованию кабельных конструкций.

В опытах А. Келли [2] для материалов с армированными волокнами рассматривалось распространение трещин параллельно волокнам (разрушение композита), предполагая два процесса диссипации энергии, характеризующей вытягивание волокна и разрыв связи. Вытягивание — это работа, выполняемая силами трения скольжения при высвобождении волокон на разрушенной матрицы, а разрыв связи — работа, выполняемая при разрушении связи между волокном и матрицей. Оценка энергии производилась по результатам эксперимента по

вытягиванию волокна из матрицы и рассмотрению физики процесса.

Извлечение токопроводящих жил из кабеля позволяет определить зависимость усилия вытягивания от сдвига конструктивных элементов, что позволит определить параметры силового фрикционного взаимодействия с целью их введения в метод оценки усталости гибких кабелей при циклическом изгибе. При испытаниях по оценке связи продольных сдвигов элементов конструкции гибкого кабеля с параметрами их силового фрикционного взаимодействия можно осуществлять извлечение одной, двух, трех и более токопроводящих жил (ТПЖ) из образца кабеля.

Целью данной работы является оценка силового взаимодействия элементов конструкции кабеля при деформациях изгиба. Для достижения поставленной цели необходимо разработать методы оценки связи сдвигов элементов с характеристиками их фрикционного взаимодействия и способ определения трибологических характеристик элементов конструкции гибкого кабеля.

Испытания по извлечению элементов из гибкого кабеля проводились на разрывной машине. Для испытания выбирались образцы кабелей марок КГ 3×4+1×2,5 и КПГС 3×4+1×2,5 из серийно изготовленных партий. Рабочая длина извлекаемой жилы принималась равной длине шага общей скрутки жил. Подготовленный образец не извлекаемыми жилами закреплялся в верхнем захвате разрывной машины. Извлекаемая жила закреплялась в нижнем подвижном захвате. Для исключения перемещения шланговой оболочки она скреплялась с неподвижными ТПЖ без радиального усилия [3].

Испытания проводились при скорости подвижного зажима, составляющей 200 мм/мин. На больших скоростях чистота эксперимента нарушалась из-за динамических нагрузок, которые возникали при резком срыве элементов перед началом скольжения. Усилие регистрировалось автоматически на диаграмме.

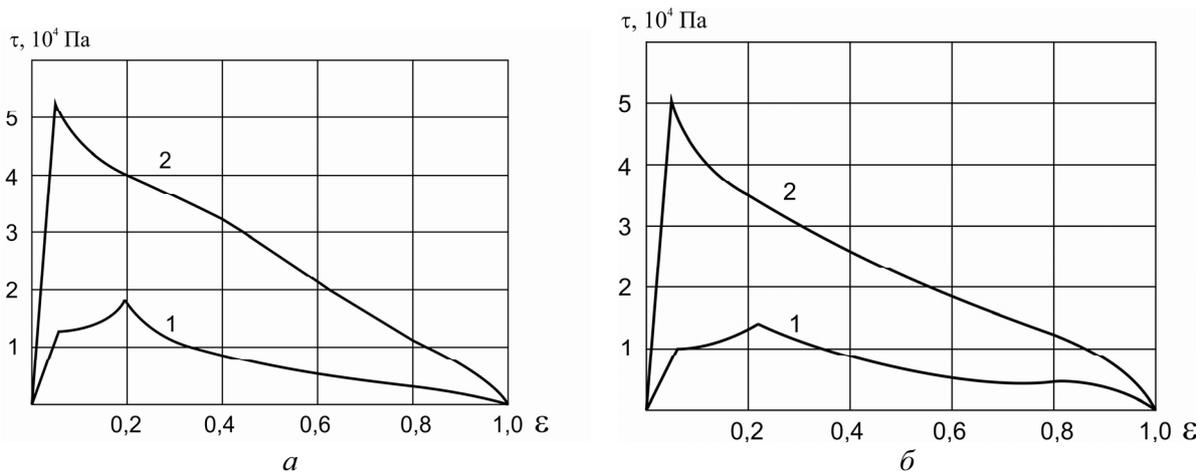


Рис. 1. Диаграмма «напряжение-сдвиг» для кабелей КПГС (1) и КГ (2) при извлечении ТПЖ: а) одной; б) двух

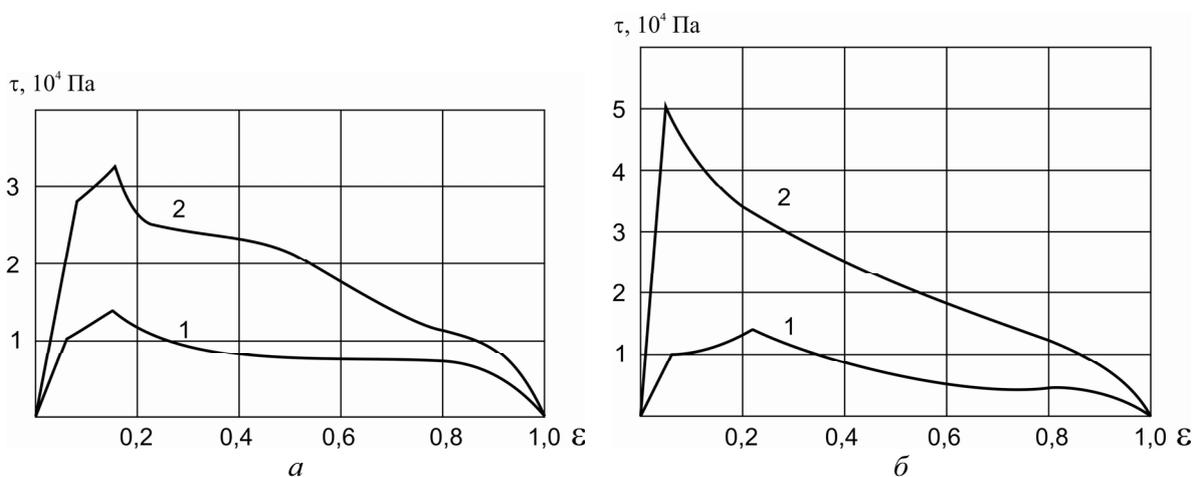


Рис. 2. Диаграмма «напряжение-сдвиг» для кабелей КПГС (1) и КГ (2) при: а) извлечении трех ТПЖ; б) снятии оболочки

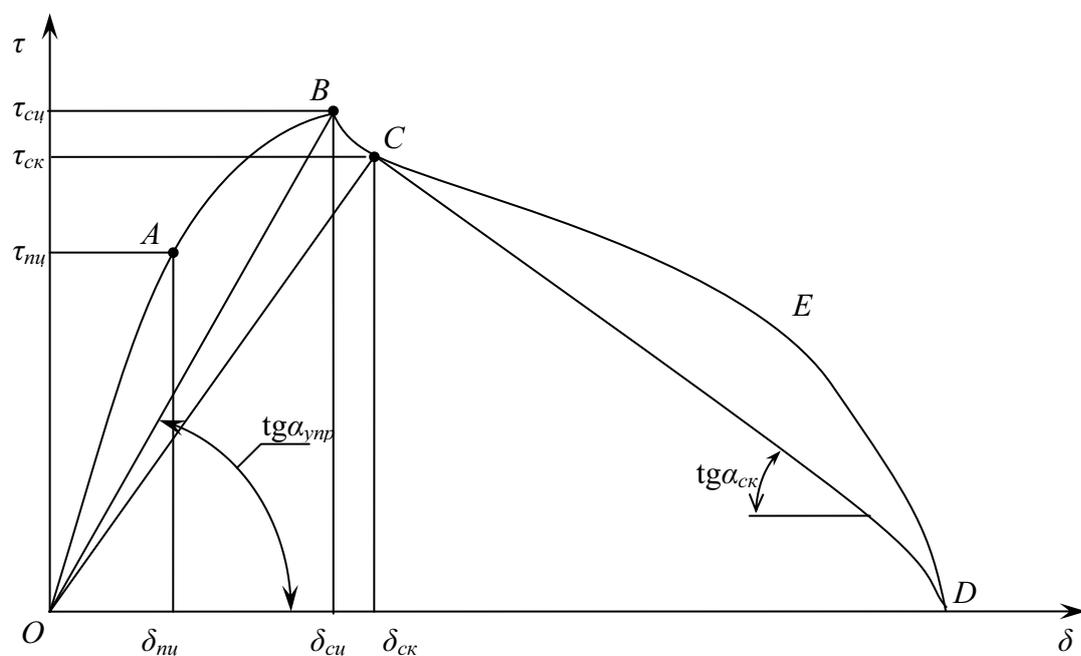


Рис. 3. Обобщенная диаграмма напряжение-сдвиг «τ-ε»

Аналогично были сняты данные при удалении из конструкции двух, трех жил и шланговой оболочки. Проводился эксперимент и для другой партии образцов, когда рабочая длина извлекаемой ТПЖ равнялась двум шагам скрутки, а длина оболочки оставалась прежней, равной шагу скрутки жил.

Результаты эксперимента статистически обрабатывались методом интервальной оценки и затем строились обобщенные диаграммы « $\tau$ – $\varepsilon$ ».

Касательные напряжения  $\tau$  и относительный сдвиг  $\varepsilon$  определялись по формулам:  $\tau = P/S$ ;  $\varepsilon = \delta/l$ , где  $P$  – усилие извлечения элемента кабеля;  $S$  – суммарная площадь контакта извлекаемого элемента;  $\delta$  – сдвиг извлекаемого элемента;  $l$  – длина испытуемого кабеля.

На рис. 1,2 приведены экспериментальные диаграммы «напряжение  $\tau$  – сдвиг  $\varepsilon$ » для кабелей КГ и КППС при извлечении одной, двух, трех жил и снятия оболочки. Обобщенная диаграмма « $\tau$ – $\varepsilon$ » для случаев, когда рабочая длина извлекаемого элемента была равной шагу скрутки, и когда рабочая длина принималась равной двум шагам скрутки, приведена на рис. 3.

Из диаграмм « $\tau$ – $\varepsilon$ » (рис. 1, 2), полученных при извлечении ТПЖ из кабеля, можно сделать вывод о том, что участки  $OA$  и  $AB$  (рис. 3) характеризуют свойства материалов и технологический процесс (обжатие, свариваемость, температурный режим шприцевания и вулканизации), которые определяют величины касательных напряжений. Участок  $CD$  скорее характерен для условий эксплуатации, когда в результате изгиба (возможно и многократного) произошел срыв контактирующих элементов, и они смещаются на любую величину. Поэтому тангенс угла наклона секущего модуля  $\text{tg}\alpha_{\text{упр}} = \tau_{\text{ср}}/\delta_{\text{ср}}$  (индекс  $\text{ср}$  обозначает сцепление) характеризует упругие свойства материала при их взаимодействии и является характеристикой взаимодействия по контактирующим поверхностям в готовом изделии. Данный коэффициент позволяет оценивать адгезионные характеристики контактирующих материалов с течением времени, т. е. косвенно можно оценивать старение изоляционно-шланговых покрытий, что является важным для кабелей стационарной прокладки. Площадь под кривой  $OC$  есть работа сил адгезии и характеризует энергию, затраченную в основном на упругую деформацию  $A_{\text{уд}}$ .

Тангенс угла скольжения  $\text{tg}\alpha_{\text{ск}}$  является характеристикой стабилизированного процесса, когда произошел срыв элементов, началось скольжение при постоянном касательном напряжении. Площадь под кривой  $CD$  выражает работу адгезионных сил, затраченных на усталостный и абразивный износ слоев изоляции  $A_{\text{ск}}$ . Этот коэффициент является характеристикой взаимодействия контактирующих поверхностей при сдвиге элементов конструкции, т. е. отражает поведение гибкого кабеля в условиях эксплуатации – при циклическом нагружении.

В предположении упругого сдвига касательное напряжение пропорционально относительному сдвигу:

$$\tau = \delta \text{tg}\alpha'_{\text{упр}},$$

где  $\text{tg}\alpha'_{\text{упр}}$  – коэффициент пропорциональности или тангенс угла наклона линейного участка диаграммы « $\tau$ – $\delta$ ».

К усилиям сдвига на единицу длины токопроводящей жилы можно перейти по формуле:

$$t = p\tau = \delta p \text{tg}\alpha'_{\text{упр}},$$

где  $p$  – суммарная ширина поверхностей контакта по наружному периметру токопроводящей жилы.

Очевидно, что  $p = \pi d_{\text{ж}}$ , где  $d_{\text{ж}}$  – наружный диаметр жилы по слою изоляции.

Отсюда следует, что в предположении только упругого взаимодействия элементов, погонные распределенные касательные усилия являются функцией относительных сдвигов.

В таблице сведены значения коэффициентов пропорциональности (упругие характеристики) для зоны упругих деформаций  $\text{tg}\alpha'_{\text{упр}}$ , для зоны упруго-фрикционных сдвигов  $\text{tg}\alpha_{\text{упр}}$  и зоны скольжения  $\text{tg}\alpha_{\text{ск}}$ . Кроме того, в таблицу внесены значения и отношения работ, затраченных на упруго-фрикционный сдвиг и сил трения скольжения.

Из таблицы видно, что для кабеля КППС, который в процессе изготовления был хорошо талькирован, т. е. была обеспечена необходимая подвижность токопроводящих жил, коэффициент пропорциональности более чем в 3 раза меньше, чем значения этих коэффициентов для кабеля КГ. Это видно из диаграмм (рис. 1, 2), линейный участок у диаграммы для кабеля КГ круче и по абсолютному значению больше. Тангенс угла скольжения  $\text{tg}\alpha_{\text{ск}}$  для кабеля КППС также меньше, чем для кабеля КГ. Представляет интерес отношение  $A_{\text{уд}}/A_{\text{ск}}$  для кабелей, у которых малая подвижность жил; работа, затраченная на упруго-фрикционный сдвиг, значительна и сравнима с работой сил трения скольжения. Для кабелей с хорошей подвижностью ТПЖ эта работа меньше работы сил трения скольжения.

Таким образом, при изгибе кабеля его конструктивные элементы находятся в условиях упругих деформаций, упруго-фрикционного и фрикционного сдвигов, причем доля упруго-фрикционных сдвигов значительна, а для кабелей с малой подвижностью ТПЖ сравнима с фрикционными сдвигами. Связь между касательными напряжениями и сдвигами выражается через коэффициенты пропорциональности, равные тангенсам углов наклона участков диаграммы « $\tau$ – $\varepsilon$ ».

Отдельные элементы не только кабелей, но других свитых изделий, например, пряди внутри каната и т. д. двигаются и трутся друг о друга в процессе работы, что может привести к их износу или обрыву и существенно влияет на прочность и надежность самих изделий. Трение между элементами зависит от характера свивки и касания в процессе работы (точечного, линейного). Например, при циклических изгибах кабеля во время работы происходит перемещение его элементов относительно друг друга. В связи с выше изложен-

**Таблица.** Результаты исследования упругих характеристик гибких кабелей

Условия эксперимента	Марка кабеля							
	КГ 3×4+1×2,5				КПГС 3×4+1×2,5			
	$\text{tg}\alpha'_{\text{упр}}$	$\text{tg}\alpha_{\text{упр}}$	$\text{tg}\alpha_{\text{ск}}$	$A_{\text{адг}}/A_{\text{ск}}$	$\text{tg}\alpha'_{\text{упр}}$	$\text{tg}\alpha_{\text{упр}}$	$\text{tg}\alpha_{\text{ск}}$	$A_{\text{адг}}/A_{\text{ск}}$
Извлечение:								
Одной ТПЖ	–	93,0	4,3	0,12	28,0	8,6	1,1	0,91
Двух ТПЖ	–	74,3	2,1	1,11	20,0	9,0	1,0	0,82
Трех ТПЖ	33,4	28,5	2,7	1,10	12,9	6,8	1,1	0,85
Снятие оболочки	17,5	12,2	1,2	0,09	13,2	7,9	0,9	0,53

ным, представляет интерес оценка силы трения и коэффициента трения отдельных элементов внутри свитых изделий.

Гипотетически элемент свитого изделия можно представить тонкой гибкой нерастяжимой нитью, которая равномерно намотана на цилиндр. На основании формулы Эйлера о трении тонкой гибкой нити о круглый цилиндр [4] определяют зависимость между удерживающей силой  $Q_1$  и стягивающей силой  $Q_2$

$$Q_2 = Q_1 e^{f\beta},$$

где  $f$  – коэффициент трения в момент начала перемещения нити;  $\beta$  – угол охвата тонкой гибкой нитью круглого цилиндра.

Силу трения определяют по формуле

$$F_{\text{тр}} = Q_2 - Q_1.$$

Для кабельных изделий угол охвата можно выразить через геометрические параметры, а именно через угловую координату

$$\beta = \frac{2\pi l}{H},$$

где  $H$  – шаг скрутки кабеля.

Из приведенных выше формул легко выводится выражение для вычисления коэффициента трения  $f$

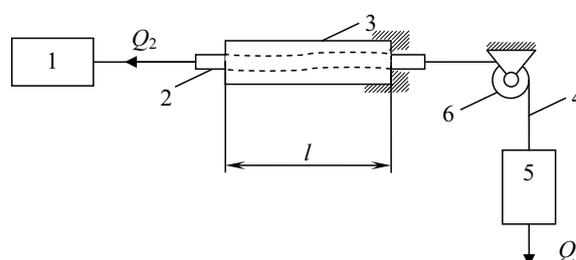
$$f = \frac{H}{2\pi l} \ln \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Заметим, что приведенные выше формулы справедливы только при условии поддержания площади контакта трущихся элементов на одном уровне.

Для реализации способа определения силы и коэффициента трения [5] в готовом свитом (скрученном) изделии была использована следующая схема (рис. 4). Схема включает измеритель силы с растягивающей установкой – 1, соединенный с одним концом испытуемого элемента – 2 изделия – 3. Другой конец элемента – 2 изделия – 3 соединен с грузом – 5 нитью – 4, которая перекинута через блок – 6. Со стороны нити концы остальных элементов изделия, например, жилы и оболочку кабеля устанавливают неподвижно. В качестве растягивающей установки может служить разработанное устройство для испытания материалов на растяжение.

Для измерения силы и коэффициента трения выбирают свитое изделие, например, кабель, и оставляют концы свободными. Один конец эл-

емента – 2 устанавливают в подвижных захватах растягивающей установки – 1, другой его конец соединяют с нитью – 4. Со стороны нити – 4 другие элементы изделия – 3 соединяют с неподвижным захватом. При создании определенного усилия  $Q_2$  элемент – 2 изделия – 3 начнет перемещаться вместе с грузом – 5. Это усилие фиксируется с помощью измерителя силы растягивающей установки – 1.



**Рис. 4.** Схема реализации способа определения силы и коэффициента трения: 1) растягивающее устройство; 2) элемент кабеля; 3) кабель; 4) нить; 5) груз; 6) блок

Реализация способа не ограничена описанным примером. Возможно измерение параметров, характеризующих процесс трения отдельных элементов или самих изделий в целом относительно неподвижных элементов или изделий.

Для автоматизации процесса испытаний кабельных конструкций и получения результатов в реальном масштабе времени создано устройство для испытаний материалов на растяжение [6]. Устройство снабжено чувствительными датчиками [7], которые являются преобразователями механических величин в электрические импульсы для передачи данных в системный блок компьютера. С помощью разработанного устройства можно проводить испытания по определению трибологических характеристик не только материалов, но и элементов кабельной конструкции.

Созданное устройство и способы являются средством и методом исследования механических характеристик материалов и элементов конструкций кабелей. При испытании кабелей можно получить как упругие, так и трибологические характеристики времени с автоматической регистрацией изменения деформаций от прикладываемых усилий. Применение компьютерных технологий и пакета прикладных математических программ повышает точность измерений и производительность обработки полученных данных [8]. Получение упругих и трибологических характеристик элемен-

тов конструкции кабеля позволит выдвинуть научно-обоснованные требования к характеристикам кабельных изделий с целью повышения их долговечности.

#### Заключение

Предложен способ оценки силового взаимодействия элементов кабельных конструкций и на его

основе оценки усталости гибких кабелей при их циклическом изгибе.

Представлен способ определения силы и коэффициента трения элементов в готовом изделии и схема его реализации. Для автоматизации испытаний предложено устройство для оценки параметров силового взаимодействия элементов конструкции кабеля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соханев Б.В., Исмаилов Г.М., Мусалимов В.М. Оценка сдвигов элементов конструкции гибкого кабеля // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 6. – С. 26–29.
2. Kelly A. Interface effects and the work of fracture of a fibrous composite // Proc. Roy. Soc. Lond. A. – 1970. – V. 319. – P. 95–116.
3. Шиянов В.Д. Методика и устройства ускоренной оценки долговечности гибких кабелей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1987. – 160 с.
4. Крагельский И.В., Щедров В.С. Развитие науки о трении. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 235 с.
5. Способ определения силы трения и коэффициента трения: пат. 2408869 Рос. Федерация. № 2009139603/28; заявл. 26.10.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. – 6 с.: ил.
6. Устройство для испытания материалов на растяжение: пат. 2392604 Рос. Федерация. № 2009120951/28; заявл. 02.06.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17. – 8 с.: ил.
7. Датчик-преобразователь перемещений: пат. 87251 Рос. Федерация. № 2009122837/22; заявл. 15.06.2009; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. – 7 с.: ил.
8. Мусалимов В.М. и др. Идентификация динамики процесса циклического изнашивания // Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем: Матер. VI Междунар. науч. школы. – СПб.: ИПМаш РАН, 2003. – С. 52–59.

Поступила 05.05.2010 г.

УДК 577.3.01;577.38

## НЕЛОКАЛЬНАЯ РЕАКЦИОННО-ДИФфуЗИОННАЯ ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ КРЕСТООБРАЗНЫХ ДВУМЕРНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР

А.В. Борисов, А.Ю. Трифонов, А.В. Шаповалов

Томский политехнический университет  
Томский государственный университет  
E-mail: trifonov@tpu.ru

*Численными методами получены двумерные крестообразные диссипативные структуры, описываемые реакционно-диффузионным уравнением Фишера–Колмогорова–Петровского–Пискунова с нелокальным взаимодействием и начальным распределением, локализованным в окрестности четырех центров. Исследовано изменение формы структуры в зависимости от расположения центров локализации и параметров уравнения.*

#### Ключевые слова:

*Реакция-диффузия, нелокальные взаимодействия, популяционная динамика, модель Фишера–Колмогорова–Петровского–Пискунова, диссипативные структуры.*

#### Key words:

*Reaction-diffusion, nonlocal interactions, population dynamics, the Fisher–Kolmogorov–Petrovsky–Piskunov model, dissipative structures.*

#### Введение

Физические, химические, биологические системы, в которых в ходе эволюции спонтанно возникают пространственные и временные структуры, служат примерами проявления процессов самоорганизации в нелинейных системах далеких от равновесия [1]. Процессы самоорганизации в различных системах подчиняются некоторым общим закономерностям, выявлению которых способствует анализ сравнительно простых систем.

Хорошо известно, что подобные структуры, называемые диссипативными структурами (ДС), образуются в реакционно-диффузионных (РД) системах, состоящих из двух или нескольких взаимодействующих компонент [2]. В [3, 4] показано, что процесс формирования ДС может возникать и в однокомпонентной РД системе с нелокальным взаимодействием на примере обобщенной одномерной модели Фишера–Колмогорова–Петровского–Пискунова (ФКПП). Уравнение ФКПП