Том 9, номер 3, 2020

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА	
Влияние температурного регулирования при работе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой	
Б. Джарум, Д. А. Соловьёв, А. А. Семенов, Н. В. Щукин, С. Б. Выговский, А. И. Аль-Шамайлех, Х. А. Танаш	201
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	
Высокодисперсные солитоны, описываемые системой нелинейных дифференциальных уравнений с учетом брэгговской решетки	
К. В. Кан, Н. А. Кудряшов	210
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	
Математическая модель акустического тракта эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров тепловыделяющей сборки ядерного реактора в приближении геометрической акустики	
А. В. Воронина, С. В. Павлов	217
АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА	
Коррекция длительности импульсов помех в КМОП комбинационных логических элементах при сборе заряда с треков одиночных частиц	
В. Я. Стенин, Ю. В. Катунин	226
ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА	
Применение мультизадачной модели для практических задач генерации заголовка, определения лемм и ключевых слов	
И. А. Молошников, А. В. Грязнов, Д. С. Власов, Р. Б. Рыбка, А. Г. Сбоев	236
Prime Conditions for Integers	
André Maïsseu	245
Структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии	
В. В. Бочкарев, Б. Д. Бриллиантов, А. В. Крянев, А. А. Бацулин, С. Г. Климанов, О. Ю. Литвиненко, Д. В. Мамай, Д. Е. Слива, Д. С. Смирнов, П. А. Стряпушкин, В. И. Терешкин, Д. Т. Ханбикова	256
Статистический анализ связи между состоянием плаценты и хронической болезнью почек	
Ю. Б. Котов, И. В. Баринова, И. Г. Никольская, Т. А. Семенова	262

Метод комплексирования данных в системе распределенного мониторинга

А. А. Моисеев

Комплексный инструмент для автоматизированного тонально-эмотивного анализа тематических текстов

А. В. Наумов, А. А. Селиванов, И. А. Молошников, А. Г. Сбоев 270

279

_

Volume 9, Number 3, 2020

Technical Physics	
Temperature Regulation Contribution during the Power Control of the VVER-1000 and VVER-1200 Reactors in a Load-Following Mode	
B. Djaroum, D. A. Solovyev, A. A. Semenov, N. V. Schukin, S. B. Vygovskya, A. I. Al-Shamayleh, and H. A. Tanas	201
Differential Equations and Dynamic Systems	
Highly Dispersive Solitons Described by the System of Nonlinear Differential Equations Including a Bragg Grating	
K. V. Kan and N. A. Kudryashov	210
Mathematical Modeling and Computer Simulation	
Mathematical Model of an Acoustic Tract of an Echo-Pulse Method for Measurement of the Geometric Parameters of a Fuel Assembly of a Nuclear Reactor in the Geometric Acoustics Approximation	
A. V. Voronina and S. V. Pavlov	217
Automation and Electronics	
Correction of the Duration of Error Pulses in CMOS Combinational Logic Elements when Collecting Charge from Tracks of Single Particles	
V. Ya. Stenin and Yu. V. Katunin	226
Applied Mathematics and Informatics	
Application of a Multitasking Model for Practical Tasks of Heading Generation, Definition of Lemmas and Keywords	
I. A. Moloshnikov, A. V. Gryanov, D. S. Vlasov, R. B. Rybka, and A. G. Sboev	236
Базовые условия для простых целых чисел	
Андре Мэсё	245
Structure of the Support System for Making Optimal Decisions during the Decommissioning of Nuclear Facilities	
V. V. Bochkarev, B. D. Brilliantov, A. V. Kryanev, A. A. Batsulin, S. G. Klimanov, O. Yu. Litvinenko, D. V. Mamai, D. E. Sliva, D. S. Smirnov, P. A. Stryapushkin, V. I. Tereshkin, and D. T. Khanbikova	256
Statistical Analysis of the Relationship between Placenta Condition and Chronic Kidney Disease	
Yu. B. Kotov, I. V. Barinova, I. G. Nicolskava, and T. A. Semenova	262

Data Fusion Method in a Distributed Monitoring System

A. A. Moiseev

Method for Automated Intelligent Emotive and Sentiment Analysis of Texts with a Thematic Focus

A. V. Naumov, A. A. Selivanov, I. A. Moloshnikov, and A. G. Sboev

279

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, с. 201–209

____ ТЕХНИЧЕСКАЯ _____ ФИЗИКА

УДК 621.039.5

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ВВЭР-1000 И ВВЭР-1200 В РЕЖИМЕ СЛЕДОВАНИЯ ЗА НАГРУЗКОЙ

© 2020 г. Б. Джарум^{1,*}, Д. А. Соловьёв¹, А. А. Семенов¹, Н. В. Щукин¹, С. Б. Выговский¹, А. И. Аль-Шамайлех¹, Х. А. Танаш¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия *e-mail: bel.djar111215@gmail.com; vulture@inbox.ru Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

После доработки 26.06.2020 г. Принята к публикации 08.09.2020 г.

Для регулирования нагрузки энергосистемы широко применяются существующие тепловые электростанции, а действующие АЭС используются в основном в базовом режиме. Однако в настоящее время системы электроснабжения требуют регулирования выработки ядерной электроэнергии. В этой связи актуальной становится задача адаптации АЭС к новым специфическим условиям работы в переменном режиме. Для решения этой задачи предлагается разработка усовершенствованных алгоритмов, предназначены для улучшения управления мощностью реакторной установки (РУ) в маневренных режимах. В связи с этим, был разработан специальный алгоритм управления мощностью РУ, в котором внедрено температурное регулирование с целью уменьшения амплитуды воздействия других регуляторов, таких как борная кислота и органы регулирования СУЗ. Настоящая статья посвящена анализу влияния температурного регулирования на режимы слежения за нагрузкой для РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, на величину аксиального офсета и на объем водообмена при управлении мощностью энергоблоков в маневренном режиме. Результаты работы позволяют сделать следующий вывод: использование температурного регулирования в режимах слежения за нагрузкой позволяет удерживать текущий аксиальный офсет в рекомендуемой области и позволяет снизить водообмен более чем на 40%.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, температурное регулирование, аксиальный офсет, водообмен

DOI: 10.1134/S2304487X20030037

введение

Для регулирования нагрузки энергосистемы широко применяются существующие тепловые электростанции, а действующие АЭС в основном используются в базовом режиме. Однако, задача работы АЭС в маневренных режимах с каждым годом становится все более актуальной. При этом для обеспечения работы АЭС в этих режимах предлагается разработать усовершенствованные алгоритмы управления [1-3]. При этом сложность такой задачи управления для РУ с ВВЭР заключается в том, что изменение мощности реактора приводит к возникновению в активной зоне нестационарного ксенонового отравления, которое влияет на локальные мощности твэл, а это в свою очередь может привести к повреждению их оболочек [4].

Напоминаем, что управление реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 заключается в перемещении ОР СУЗ и применении борного регулирования с поддержанием аксиального офсета и скорости изменения мощности в допустимых пределах с точки зрения безопасной эксплуатации АЭС. При этом следует отметить, что как в зарубежных, так и в современных российских научных работах последних лет, просматривается тенденция к применению температурного регулирования в режимах нормальной эксплуатации [5–9].

В нашей работе проведены количественные оценки влияния температурного регулирования при управлении мощностью РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Для решения поставленной задачи был использован программный комплекс ПРОСТОР, предназначенный для проведения расчетов взаимосвязанных нейтронно-физических и теплогидравлических процессов, происходящих в РУ ВВЭР-1000/1200 [10], и разработан специальный алгоритм управления мощностью РУ, включающий три регулятора (ОР СУЗ, борная кислота и температура в 1 контуре), а также функцию расчета объема водообмена. В этом алгоритме были учтены все рекомендуемые ограничения с точки зрения безопасности эксплуатации АЭС. Разработанный алгоритм применен для управления моделями энергоблоков ВВЭР-1000/1200 в режиме слежения за нагрузкой: 15 суточных циклов с изменением мощности 100–50–100% в течение 4–6– 14 часов. Полученные результаты представлены ниже, и отмечена положительная роль температурного регулирования в перспективе перехода АЭС с ВВЭР-1000/1200 от базового в маневренный режим работы.

УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ РУ С ВВЭР

На сегодняшний день энергоблоки АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 эксплуатируются в базовом режиме, поэтому в основу регулирования их мощности положено поддержание постоянного давления пара во втором контуре, поддержание постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре и поддержание постоянной температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора [11, 12]. Однако оборудование первого контура этих реакторов рассчитано на возможность их эксплуатации в режиме регулирования частоты и мощности в энергосистеме. В связи с этим, регламентом нормальной эксплуатации АЭС определена скорость разгрузки и нагрузки, установлены диапазоны регулирования и другие ограничения, приведенные для ВВЭР-1000 в работе [13]. Для ВВЭР-1200 эти ограничения будут иными: при увеличении мощности реактора в диапазоне от минимально-контролируемого уровня мощности (МКУ) до 45% W_{HOM} и от 45 до 100% W_{HOM} , скорость набора мощности не должна превышать 3% W_{НОМ}/мин и 1% W_{НОМ}/мин соответственно, а при уменьшении мощности в диапазоне от 100% до МКУ, скорость разгрузки не должна превышать 3% W_{НОМ}/мин. При повышении мощности после длительной работы (более 2-х недель) на любом пониженном уровне мощности от 45% $W_{\rm HOM}$ скорость набора мощности не более 10% $W_{\rm HOM}/$ час, а от 80% $W_{\rm HOM}$ – не более 1% $W_{\rm HOM}/$ час. Скорость изменения температуры ($\Delta T/\Delta t$) и давления во втором контуре ($\Delta P/\Delta t$) не более 10°С/час и 0.04 МПа/мин соответственно.

При этом во время маневрирования требуется поддерживать равномерность энерговыделения по высоты активной зоны, а также соблюдать ограничения нормальной эксплуатации АЭС [14, 15]. Текущее высотное энерговыделение контролируется с помощью офсет-мощностной фазовой диаграммы [16], когда поддержание текущей фазовой точки в рекомендуемой области диаграммы, путем определения направления перемещения ОР СУЗ по высоте активной зоны, ограничивает изменение локальной мощности, а также сдерживает развитие аксиальных ксеноновых колебаний [17–20]. При снижении мощности допускается выход текущей точки диаграммы за пределы рекомендуемой области на время не более 12 ч, но в любом случае при увеличении мощности в диапазоне 75–100% текущая точка должна находиться в рекомендуемой области. Таким образом, можно сказать, что аксиальный офсет (AO) является количественной мерой равномерности энерговыделения реактора [21–24].

РАЗРАБОТАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

В настоящей статье рассматриваются результаты применения температурного регулирования при управлении мощностью РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 при суточном маневрировании мощностью 100–50–100%. График нагрузки состоит из следующих этапов: снижения мощности от 100 до 50%, работы на мощности 50% в течение 6 ч, увеличения мощности до 100% и работы на этой мощности до конца текущих суток. Мощность изменяется со скоростью 1%/мин. В работе анализируются 15 повторяющихся суточных циклов. Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса ПРОСТОР в условиях стационарных кампаний ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Для управления мощностью реакторов BBЭP-1000 и BBЭP-1200 был разработан алгоритм, использующий следующие управляющие воздействия на мощность активной зоны: температуру на входе в реактор, концентрацию борной кислоты в реакторе и перемещения OP CV3. В алгоритме так же используется функция для вычисления допустимых границ аксиального офсета в зависимости от текущей мощности реактора. Полученные границы были использованы для ограничения перемещения OP CV3.

При этом регулирующие функции были описаны уравнениями (1)–(11):

$$T = W \cdot \frac{(296.2 - 285.0)}{(100 - 0)} + 285.0 +$$

9.5 · (P_{2K} - P_{HOM}) для ВВЭР-1200, (1)

$$T = W \cdot \frac{(289.0 - 278.0)}{(100 - 0)} + 278.0 +$$
(2)

+9.5 · (
$$P_{2K} - P_{HOM}$$
) для ВВЭР-1000,

где:

• T – температура теплоносителя на входе в реактор при изменении мощности и давления во втором контуре, °C;

• *W* – текущая мощность реактора, %;

• P_{2K} – давление пара во втором контуре, МПа;

*P*_{НОМ} – давление пара во втором контуре при номинальной мощности (6.8 МПа для ВВЭР-1200 и 5.815 МПа для ВВЭР-1000).

$$AO = \frac{(W_{\text{Bepx}} - W_{\text{Hu3}})}{(W_{\text{Bepx}} + W_{\text{Hu3}})} \cdot 100,$$
(3)

$$AO_{\rm II} = -2.6 + (AO_{\rm Cra6} + 2.6)W_{\rm Cra6}/100,$$
 (4)

$$AO_{\rm Bepx} = -2.6 + (AO_{\rm II} + 7.6)100/W, \tag{5}$$

$$AO_{\rm H_{\rm H3}} = -2.6 + (AO_{\rm LI} - 2.4)100/W, \tag{6}$$

где:

• АО – текущий аксиальный офсет, %;

• *W*_{Верх} – мощность верхней половины активной зоны реактора, %;

• $W_{\rm Hu_3}$ — мощность нижней половины активной зоны реактора, %;

• *АО*_Ц – центральный офсет, соответствующий центральной траектории, %;

• *АО*_{Стаб} – стабильный офсет (12 суток работы на постоянной мощности), %;

*W*_{Стаб} — постоянная мощность (12 суток работы на данной мощности), %

• W – текущая мощность реактора, %;

• *AO*_{Верх} – верхняя граница коридора разрешенных значений *AO*, %;

• *АО*_{Низ} – нижняя граница коридора разрешенных значений *АО*, %.

Различные значения стабильного офсета $AO_{\rm Стаб}$, т.е. такого офсета, который получился вследствие работы реактора более 12 суток на постоянной мощности, для различных топливных загрузок и моментов топливной кампании приведут к разным значениям центрального офсета ($AO_{\rm L}$), а следовательно, и к разным значениям допустимых границ $AO_{\rm Bepx}$ и $AO_{\rm Hи3}$.

Так же для работы алгоритма нужно уметь переходить от мощности реактора к мощности турбогенератора, поскольку график несения нагрузки задается для электрической мощности. При этом нужно отметить, что величина тепловых потерь на парогенераторах составляет около 0.5%. Так же для более точной оценки электрической мощности следует учитывать, что КПД зависит от температуры окружающей среды и величины вакуума в конденсаторе, что в оценочных формулах (7)–(11) не учитывается.

$$W_{\Pi\Gamma} = 0.998W, \tag{7}$$

$$N = 1 - W_{\Pi\Gamma} / W_{\rm HOM},\tag{8}$$

КПД =
$$27.7716 + 0.00209505W^2 - (10)$$

$$W_{\rm T\Gamma} = W {\rm K} \Pi {\rm A}, \tag{11}$$

гле:

• W – текущая мощность реактора, %;

• $W_{\Pi\Gamma}$ – мощность парогенераторов, МВт;

• W_{HOM} – номинальная мощность активной зоны, МВт;

• КПД – коэффициент полезного действия (КПД_{max} = 0.3628, КПД_{min} = 0.302), о.е.;

• $W_{\rm T\Gamma}$ – мощность турбогенератора, МВт.

Сам алгоритм управления предполагает выбор приоритетных управляющих воздействий. При поднятии мощности реактора были выбраны следующие приоритеты: изменение температуры на входе в реактор, ввод/вывод борной кислоты в реактор, затем перемещение ОР СУЗ, а для других этапов графика нагрузки, приоритеты управляющих воздействий были следующие: изменение температуры, перемещение ОР СУЗ, а затем ввод/вывод борной кислоты.

Для оценки объемов водообмена были использованы следующие уравнения:

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \frac{G}{V \cdot \rho} (C_{\text{подпитки}} - C(t)), \qquad (12)$$

$$C(t)|_{t=0} = C_0, (13)$$

$$G \cdot T_{\text{подпитки}} = V \cdot \rho \cdot \ln \left[\frac{C_{\text{подпитки}} - C_0}{C_{\text{подпитки}} - C} \right], \quad (14)$$

где:

• C(t) — текущая концентрация борной кислоты в первом контуре, г/кг;

• C_0 — концентрация борной кислоты в первом контуре на момент начала водообмена, г/кг;

• $T_{\text{подпитки}}$ – время, в течение которого происходит подпитка, ч;

• *С* – концентрация борной кислоты в первом контуре на момент завершения подпитки, г/кг;

• *G* – расход подпитки, т/ч;

• ρ – плотность теплоносителя первого контура, т/м³;

• *V* – объем теплоносителя первого контура, приблизительно 300 м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим результаты моделирования управления мощностью ВВЭР-1200 для середины (170 эфф. сутки) восьмой топливной кампании 6 блока Нововоронежской АЭС и мощностью ВВЭР-1000 для середины (291 эфф. сутки) двенадцатой топливной кампании 3 блока Калинин-



Рис. 1. Концентрации борной кислоты в реакторе BBЭP-1200 при суточном маневре мощностью и широком диапазоне температурного регулирования $\Delta P = \pm 0.3$ Мпа.

ской АЭС. При моделировании работы этих реакторов в маневренном режиме 100-50-100% было отмечено, что во время первых циклов переменного графика нагрузки, параметры управляющих воздействий (положения ОР СУЗ, температура на входе и концентрация борной кислоты в реакторе) проходят через несколько циклов нестационарных изменений. Продемонстрируем это на рис. 1 для ВВЭР-1200, для ВВЭР-1000 ситуация будет аналогичной.

Для более наглядного представления полученных результатов управления мощностью РУ, были выбраны 2 последних установившихся цикла из 15. Результаты моделирования приведены соответственно на рис. 2 и 3 для двух случаев выбранного диапазона изменения давления пара во втором контуре реактора, а именно:

• без температурного регулирования ($\Delta P = 0$ МПа);

• широкий диапазон температурного регулирования ($\Delta P = \pm 0.3 \text{ M}\Pi a$).

При анализе полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

• При применении широкого диапазона температурного регулирования ($\Delta P = \pm 0.3 \text{ M}\Pi a$) качество слежения за нагрузкой для BBЭP-1000 и BBЭP-1200 возросло (см. рис. 2, кривые мощности, точки *A*, *B*, *C* и *D*). • Внедрение температурного регулирования ($\Delta P = \pm 0.3 \text{ МПа}$) при управлении ВВЭР-1200 привело к значительному уменьшению амплитуд борного регулирования и перемещения ОР СУЗ (см. рис. 2, кривые Н групп и H₃BO₃, точки *E* и *G*): операция водообмена и перемещение ОР СУЗ становились прерывными по сравнению с отсутствием температурного регулирования. Что касается ВВЭР-1000, максимальное использование температурного регулирования приводило к меньшим амплитудам изменения концентрации борной кислоты и положения ОР СУЗ (см. рис. 2, кривые Н групп и H₃BO₃, точки *F* и *H*).

• Продолжается увеличение температуры теплоносителя на этапе работы реакторов ВВЭР-1000/1200 на номинальной мощности (см. рис. 2, кривые Т1К, точки *I* и *J*) в целях ввода дополнительной реактивности для компенсации ксенонового разотравления.

• Как показано на рис. 2 и 3, во время маневрирования для всех трех режимов температурного регулирования (отсутствие, малый диапазон и широкий диапазон) для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 аксиальный офсет (*AO*) находился в рекомендуемой области, что было реализовано путем ограничения на перемещение ОР СУЗ по высоте активной зоны.

Кроме того, для всех режимов регулирования были выполнены оценки водообмена в 1 контуре,



Рис. 2. Изменение параметров ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000 при работе в суточном графике несения нагрузки 100-50-100%: *1, 2, 3* – Мощность (график нагрузки, активная зона и генератор) соответственно ($\Delta P = 0$ МПа); *4, 5, 6* – Мощность (график нагрузки, активная зона и генератор) соответственно ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа); *7, 8* – Положение органов регулирования (H₁₁, H₁₂) соответственно ($\Delta P = 0$ МПа); *9, 10* – Положение органов регулирования (H₁₁, H₁₂) соответственно ($\Delta P = 0$ МПа); *11, 12* – Концентрация борной кислоты в реакторе соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ±0.3 МПа); *13, 14* – Температура в первом контуре соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ±0.3 МПа); *15, 16* – Давление во втором контуре соответственно ($\Delta P = 0$ МПа и ± 0.3 МПа); *17, 18* – Ксенон в центре активной зоны соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ± 0.3 МПа); *19, 20* – Запас по линейной нагрузке соответственно ($\Delta P = 0$ МПа, ±0.3 МПа); *21* – Центральный офсет; *22, 23* – Текуший офсет соответственно ($\Delta P = 0$ Мпа, ±0.3 МПа); *24, 25* – Верхняя и нижная граница аксиального офсета.

поскольку удаляемый теплоноситель можно рассматривать как жидкие радиоактивные отходы. Эти оценки позволяют количественно оценить эффект от внедрения температурного регулирования в структуре разработанного алгоритма. Полученные результаты представлены на рис. 4 для всех рассмотренных вариантов допустимого диапазона изменения давления во втором контуре. Полученные результаты, показанные на рис. 4, позволяют подтвердить важность использования температурного регулирования с увеличенным диапазоном изменения давления во втором контуре. Таким образом, переходя от $\Delta P = 0$ МПа к $\Delta P = \pm 0.05$ МПа, а затем к $\Delta P = \pm 0.3$ МПа, мы получили снижение водообмена соответственно на 7.24% и 41.50% для ВВЭР-1000 и на 24.6% и 50.36% для ВВЭР-1200.



Рис. 3. Офсет-мощностная фазовая диаграмма управления реакторами ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000 в суточном цикле 100-50-100%: *1* – Центральный офсет; *2*, *3* – Текуший офсет соответственно ($\Delta P = 0$ МПа , ± 0.3 МПа); *4*, *5* – Верхняя и нижная граница аксиального офсета.



Рис. 4. Оценки затрат водообмена при различных вариантах работы разработанного алгоритма для ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000: *1* – Без температурного регулирования ($\Delta P = 0$ МПа); *2* – Низкий диапазон регулирования ($\Delta P = \pm 0.05$ МПа); *3* – Широкий диапазон регулирования ($\Delta P = \pm 0.3$ МПа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают эффективность применения температурного регулирования для поддержания заданного графика нагрузки и снижения водообмена в первом контуре. Причем чем больше возможность изменения температуры в первом контуре за счет допустимого изменения давления во втором контуре, тем лучше для управления. При этом достигается уменьшение влияния борного регулирования и, следовательно, значительно снижается водообмен в первом контуре: на 41.50% для ВВЭР-1000 и на 50.36% для ВВЭР-1200. При этом текущий *АО* всегда поддерживается в допустимой области.

Однако, прежде чем использовать эти алгоритмы на АЭС, следует уточнить теплотехническую надежность парогенераторов, т.к. количество циклов, глубина и скорости их нагрузки—разгрузки могут быть ниже возможностей реактора. А сами циклические нагрузки могут неблагоприятно сказаться на их ресурсе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аверьянова С.П., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС // Журн. Атомная энергия. 2015. Т. 98. № 6. С. 414–421.
- 2. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М. и др. Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на тяньВаньской АЭС (Китай) // Журн. Атомная энергия. Т. 103. № 5. С. 277–282.
- 3. Averyanova S.P., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. a. all. Adoption of improved algorithms for controlling the energy release of a VVER-1000 core at the KHMEL'NITSKII nuclear power plant // Журн. Atomic Energy. 2005. V. 98. № 6. P. 386–393.
- Maksimov M.V., Kanazirskyi N.F., Kokol E.A. Control of the axial offset in a nuclear reactor at power maneuvering // Журн. Праці Одеського політехнічного університету. 2014. V. 2. № 44. Р. 75–81. doi: 2.44.2014.15. https://doi.org/10.15276/OPU
- 5. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Филимонов П.Е. Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 // Журн. Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 4. С. 199–202.
- 6. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б. и др. Работа ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки // Журн. Атомная энергия, 2012. Т. 113. № 5. С. 247-252.
- Данилова Е.А., Малимоненко Д.В. Работа энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 в маневренном режиме при минимальном борном регулировании // Журн. Світлотехніка та електроенергетика. 2010. Т. 1. С. 71–76.
- 8. Баскаков В.Е., Максимов М.В., Маслов О.В. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы // Журн. Труды Одесского политехнического университета, 2007. Т. 2. № 28. С. 56–60.
- 9. Тодорцев Ю.К., Фощ Т.В., Никольский М.В. Анализ методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором при маневрировании // Журн. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 6. № 66. С. 2–9.
- 10. Выговский С.Б., Королев С.А., Чернов Е.В. и др. Опыт использования программного комплекса "ПРОСТОР" в расчетной поддержке эксплуатации АЭС с ВВЭР // Журн. Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 1. С. 15–28. https://doi.org/10.1134/S2079562914010151
- Тодорцев Ю.К., Цисельская Т.А., Никольский М.В. Автоматизированная система регулирования мощности энергоблока для управления ЯЭУ в маневренных режимах с постоянной температурой входа в реактор // Журн. Ядерна та радіаційна безпека. 2013. Т. 4. № 60. С. 20–25.
- Фощ Т.В., Никольский М.В., Максимов М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный

офсет // Журн. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 2. № 68. С. 19–27.

- Подшибякин М.А., Коноплев Н.П., Горохов А.К. и др. Требования к характеристикам маневренности АЭС и аспекты их выполнения в новых проектах реакторных установок с ВВЭР. ФГУП ОКБ "Гидропресс", Подольск.
- 14. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б. и др. Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки // Журн. Атомная энергия. 2013. Т. 114. № 5. С. 249–254.
- 15. Выговский С.Б., Аль Малкави Р.Т., Хачатрян А.Г. и др. Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в 1-м контуре при реализации суточных маневренных режимов // Журн. Глобальная ядерная безопасность. 2018. Т. 3. № 28. С. 49–63.
- 16. Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А. и др. Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора // Журн. Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 3. С. 123– 127.
- 17. Yoichiro SHIMAZU. Xenon oscillation Control in large PWRs using a characteristic ellipse trajectory drawn by three axial offsets // Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. 2008. V. 45. № 4. P. 257–262.
- Parhizkari H., Aghaie M., Zolfaghari A. An approach to stability analysis of spatial xenon oscillations in WWER-1000 reactors // Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 79. P. 125–132.
- Максимов М.В., Беглов К.В., Каназирский Н.Ф. Управление аксиальным офсетом ядерного реактора при маневрировании мощностью // Журн. Атоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. Т. 7. № 1. С. 54–58.
- 20. Фощ Т.В. Анализ аксиального офсета энергоблока с ВВЭР-1000 в режиме маневрирования // Журн. Праці Одеського політехнічного університету. 2014. Т. 1. № 43. С. 97–103. https://doi.org/10.15276/OPU.1.43.2014.18
- 21. *Никольский М.В.* Аксиальный офсет как мера устойчивости легководного ядерного реактора при суточном маневре мощностью // Журн. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2014. Т. 6. № 4. С. 65–71.
- Пелых С.Н., Назаренко А.А., Циселькая Т.А. Анализ устойчивости активной зоны ядерного реактора ВВЭР-1000 при различных программах регулирования РУ // Журн. Електроенергетика. 2011. Т. 2. № 36. С. 109–114.
- 23. Аверьянова С.П., Филимонов П.Е. Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200 // Журн. Атомная энергия. 209. Т. 107. № 6. С. 347-352.
- 24. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Филимонов П.Е. Суперпозиция интегральных и аксиальных ксеноновых колебаний и устойчивость энерговыделения активной зоны ВВЭР-1000 // Журн. Атомная энергия. 2011. Т. 111. № 1. С. 8–13.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 201-209

Temperature Regulation Contribution during the Power Control of the VVER-1000 and VVER-1200 Reactors in a Load-Following Mode

B. Djaroum^{*a*,#}, D. A. Solovyev^{*a*}, A. A. Semenov^{*a*}, N. V. Schukin^{*a*}, S. B. Vygovsky^{*a*}, A. I. Al-Shamayleh^{*a*}, and H. A. Tanash^{*a*}

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia [#]e-mail: bel.djar111215@gmail.com, vulture@inbox.ru

Received June 26, 2020; revised June 26, 2020; accepted September 8, 2020

Abstract—Thermal power plants are the most flexible concerning power level regulation. Furthermore, nuclear power plants are preferentially used for base load. Presently, electrical power systems require continuous adjustment of the nuclear energy produced. Consequently, it becomes imperative to adapt nuclear power plants to new specific operating conditions in load following operation. To solve this problem, advanced algorithms are proposed for the improvement of power control at nuclear power plants. Therefore, a special algorithm has been developed in which temperature regulation is introduced to reduce the amplitude impact of existing regulators, such as control rods and dissolved boric acid. The effect of temperature regulation on load following modes for VVER-1000 and VVER-1200 reactors, on the axial offset, and on the volume of water exchange required to control the reactor power is analyzed in this work. It has been found that the use of temperature regulation to operate nuclear power plants in load following modes makes it possible to keep the current axial offset in the recommended area and to reduce water exchange by more than 40%.

Keywords: nuclear power plants, VVER-1000, VVER-1200, temperature regulation, axial offset, water exchange

DOI: 10.1134/S2304487X20030037

REFERENCE

- Averyanova S.P., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. Vnedreniye usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya energovydeleniyem aktivnoy zony VVER-1000 na Khmel'nitskoy AES [Implementation of advanced algorithms for controlling energy release of the VVER-1000 core at the Khmelnitsky NPP] // Atomnaya energiya. 2015. V. 98. № 6. P. 414–421 (in Russian).
- 2. Averyanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M. a.all. Ispytaniye usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya energovydeleniyem VVER-1000 v usloviyakh manevrennykh rezhimov na tyan'van'skoy AES (kitay) [Testing advanced algorithms for controlling the energy release of VVER-1000 under conditions of load following operation at the Tianwan NPP (China)] // Atomnaya energiya. 2007. V. 103. № 5. P. 277–282 (in Russian).
- 3. Averyanova S.P., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. a.all. Adoption of improved algorithms for controlling the energy release of a VVÉR-1000 core at the KHMEL'NITSKII nuclear power plant // Atomic Energy. 2005. V. 98. №. 6. P. 386–393.
- Maksimov M.V., Kanazirskyi N.F., Kokol E.A. Control of the axial offset in a nuclear reactor at power maneuvering // Pratsi Odes'koho politekhnichnoho universytetu. 2014. V. 2. № 44. P. 75–81. https://doi.org/10.15276/opu.2.44.2014.15.

- Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. a.all. Temperaturnoye regulirovaniye i manevrennost' VVER-1000 [Temperature regulation and maneuverability of VVER-1000] // Atomnaya energiya. 2010. V. 109. № 4. P. 199–202 (in Russian).
- Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. a.all. Rabota VVER-1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki [Operation of VVER-1200/1300 in load following mode] // Atomnaya energiya. 2012. V. 113. № 5. P. 247–252 (in Russian).
- Danilova E.A., Malimonenko D.V. Rabota energobloka AES reaktorom VVER-1000 v manevrennom rezhime pri minimal'nom bornom regulirovanii [Operation of the NPP power unit with the VVER-1000 reactor in maneuvering mode with minimal boron regulation] // SVITLOTEHNIKA TA ELECTRICI-TY. 2010. V. 1. P. 71–76 (in Russian).
- Baskakov V.E., Maksimov M.V., Maslov O.V. Algoritm ekspluatatsii energobloka s VVER v podderzhanii sutochnogo balansa moshchnosti energosistemy [The operation algorithm of the VVER power unit in maintaining the daily balance of the power system capacity] // Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2007. V. 2. № 28. P. 56–60 (in Russian).
- Todortsev Yu.K., Foshch T.V., Nikolsky M.V. Analiz metodov upravleniya moshchnost'yu energobloka s vodo- vodyanym reaktorom pri manevrirovanii [Analysis of methods for controlling the power of a power unit

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

with a water-cooled reactor during maneuvering] // East European Journal of Advanced Technology. 2013. V. 6. \mathbb{N} 66. P. 2–9 (in Russian).

 Vygovsky S.B., Korolev S.A., Chernov E.V. a.all. Opyt ispol'zovaniya programmnogo kompleksa "PROS-TOR" v raschetnoy podderzhke ekspluatatsii AES s VVER [Use of the PROSTOR software package experience in the design support for the operation of nuclear power plants with VVER] // Nuclear Physics and Engineering. 2014. V. 5. № 1. P. 15–28. https://doi.org/10.1134/\$2079562914010151 (in Pus.

https://doi.org/10.1134/S2079562914010151 (in Russian).

- 11. Todortsev Yu.K., Tsiselskaya T.A., Nikolsky M.V. Avtomatizirovannaya sistema regulirovaniya moshchnosti energobloka dlya upravleniya YAEU v manevrennykh rezhimakh s postoyannoy temperaturoy vkhoda v reaktor [Automated power unit power control system for controlling a nuclear power plant in maneuvering modes with a constant reactor inlet temperature] // Nuclear and radiant bezpeka. 2013. V. 4. № 60. P. 20– 25 (in Russian).
- Fosch T.V., Nikolsky M.V., Maximov M.V. Analiz vliyaniya metodov upravleniya moshchnost'yu energobloka s vodo-vodyanym reaktorom na aksial'nyy ofset [Analysis of the influence of power control methods for a power unit with a water-water reactor on axial offset] // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2014. V. 2. № 68. P. 19–27 (in Russian).
- 13. Podshibyakin M.A., Konoplev N.P., Gorokhov A.K. a. all. Trebovaniya k kharakteristikam manevrennosti AES i aspekty ikh vypolneniya v novykh proyektakh reaktornykh ustanovok s VVER [Requirements for the maneuverability characteristics of nuclear power plants and aspects of their implementation in new designs of reactor plants with VVER. FGUP OKB "Gidropress", Podol'sk.
- Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. a. all. Razvitiye sposobov upravleniya VVER-1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki [Development of VVER-1200/1300 control methods in load following mode] // Atomnaya energiya. 2013. V. 114. № 5. P. 249–254 (in Russian).
- 15. Vygovsky S.B., Al Malkavi R.T., Khachatryan A.G. a. all. Optimizatsiya algoritmov upravleniya YAEU s VVER-1200 dlya minimizatsii vodoobmena v 1-om konture pri realizatsii sutochnykh manevrennykh rezhimov [Optimization of control algorithms for nuclear power plants with VVER-1200 to minimize water exchange in the first circuit during the implementation of daily maneuvering modes] // Global'naya yadernaya bezopasnost. 2018. V. 3. № 28. P. 49–63 (in Russian).
- 16. Averyanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A. a.all. Metod ofset-moshchnostnoy fazovoy diagrammy

dlya upravleniya energovydeleniyem reaktora [Offsetpower phase diagram method for controlling reactor energy release] // Atomnaya energiya. 2016. V. 121. N° 3. P. 123–127 (in Russian).

- 17. Yoichiro SHIMAZU. Xenon oscillation Control in large PWRs using a characteristic ellipse trajectory drawn by three axial offsets // Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. 2008. V. 45. № 4. P. 257–262.
- Parhizkari H., Aghaie M., Zolfaghari A. a. all. An approach to stability analysis of spatial xenon oscillations in WWER-1000 reactors // Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 79. P. 125–132.
- 19. Maksimov M.V., Beglov K.V., Kanazirsky N.F. Upravleniye aksial'nym ofsetom yadernogo reaktora pri manevrirovanii moshchnost'yu [Control of axial offset of a nuclear reactor during power maneuvering] // avtomatyzatsiya tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv. 2015. V. 7. № 1. P. 54–58 (in Russian).
- 20. Foshch T.V. Analiz aksial'nogo ofseta energobloka s VVER-1000 v rezhime manevrirovaniya [Analysis of the axial offset of a power unit with VVER-1000 in maneuvering mode] // Pratsi Odes'koho politekhnichnoho universytetu. 2014. Vol. 1. № 43. P. 97–103. https://doi.org/10.15276/OPU:1.43.2014.18 (in Russian).
- 21. Nikolsky M.V. Aksial'nyy ofset kak mera ustoychivosti legkovodnogo yadernogo reaktora pri sutochnom manevre moshchnost'yu [Axial offset as a measure of the stability of a light-water nuclear reactor with daily power maneuver] //avtomatyzatsiya tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv. 2014. V. 6. № 4. P. 65–71 (in Russian).
- 22. Pelykh S.N., Nazarenko A.A., Tsiselkaya T.A. Analiz ustoychivosti aktivnoy zony yadernogo reaktora VVER-1000 pri razlichnykh programmakh regulirovaniya RU [Analysis of the stability of the core of a VVER-1000 nuclear reactor under various reactor control programs] // ELEKTROENERGETIKA. 2011. V. 2. № 36. P. 109– 114 (in Russian).
- 23. Averyanova S.P., Filimonov P.E. Ksenonovaya ustoychivost' VVER-1200 [Xenon stability of VVER-1200] // Atomnaya energiya. 2009. V. 107. № 6. P. 347–352 (in Russian).
- 24. Averyanova S.P., Dubov A.A., Filimonov P.E. Superpozitsiya integral'nykh i aksial'nykh ksenonovykh kolebaniy i ustoychivost' energovydeleniya aktivnoy zony VVER-1000 [Superposition of integral and axial xenon vibrations and stability of energy release of the WWER-1000 core] // Atomnaya energiya. 2011. V. 111. № 1. P. 8–13 (in Russian).

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, с. 210–216

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ______ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 517.9

ВЫСОКОДИСПЕРСНЫЕ СОЛИТОНЫ, ОПИСЫВАЕМЫЕ СИСТЕМОЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С УЧЕТОМ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ

© 2020 г. К. В. Кан^{1,*}, Н. А. Кудряшов^{1,**}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия *e-mail: kan_13@mail.ru **e-mail: nakudr@gmail.com Поступила в редакцию 30.07.2020 г. После доработки 30.07.2020 г. Принята к публикации 08.09.2020 г.

В настоящее время при решении задач нелинейной оптики большое внимание уделяется анализу нелинейных лифференциальных уравнений. описывающих распространение услиненных волн в оптических средах. В данной работе изучается система уравнений в частных производных шестого порядка, использующаяся для описания распространения двух волн в брэгговской решетке. В изучаемой системе уравнений присутствует нелинейность третьей, пятой и седьмой степени. Задачей, которая решается в данной работе, является применение варианта метода простейших уравнений для поиска решений в виде уединенных волн. На первом этапе метода осуществляется переход к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, записанных с учетом переменных бегущей волны. В результате подстановки исходная система уравнений приводится к переопределенной системе, состоящей из четырех уравнений, соответствующих действительной и мнимой частям исходных уравнений. Из уравнений, соответствующих мнимым частям, получены ограничения на параметры исходных уравнений в частных производных. Определен порядок полюса общих решений дифференциальных уравнений, соответствующих действительным частям. Найденный порядок полюса позволил перейти непосредственно к методу простейших уравнений построения решений в виде уединенных волн. В работе построены аналитические решения и проанализированы графики при различных значениях параметров математической модели.

Ключевые слова: брэгговская решетка, уединенные волны, нелинейные дифференциальные уравнения, распространение импульсов, оптическое волокно

DOI: 10.1134/S2304487X20030049

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес представляет собой изучение такого явления, как распространение импульсов в нелинейных средах. Используя дифференциальные уравнения, описывающие математические модели, можно исследовать явление распространения импульсов в оптическом волокне.

Одним из важных уравнений, описывающих распространение импульсов в оптическом волокне, является следующее:

$$iq_t + ia_1q_x + a_2q_{xx} + ia_3q_{xxx} + a_4q_{xxxx} + ia_5q_{xxxxx} + a_6q_{xxxxx} + (b_1|q|^2 + b_2|q|^4 + b_3|q|^6)q = 0.$$
(1)

Ранее уравнение (1) рассматривалось в ряде работ (см., например, [6, 7]). Следует отметить, что при $a_2 \neq 0$, $a_i = 0$ ($i \neq 2$) и $b_2 = b_3 = 0$ уравне-

ние (1) является широко используемым нелинейным уравнением Шредингера:

$$iq_t + a_2 q_{xx} + b_1 |q|^2 q = 0. (2)$$

В работе [1] рассмотрена обобщенная модель распространения импульсов в оптической среде. В [2] представлены некоторые дифференциальные уравнения, которые могут быть использованы для описания данного явления. В статье [3] найдены решения в форме уединенных и периодических волн для иерархии уравнений рассматриваемого типа.

Помимо этого, следует отметить, что процесс распространения волн нередко наблюдается в рамках волоконной брэгговской решетки, представляющей собой участок оптического волокна, в сердцевине которого показатель преломления периодически изменяется в продольном направлении [4].



Рис. 1. Графики уединенных волн (40) (а) и вещественной части решения (41) (б) при t = 10, a = 1.5, $\alpha = 0.7$, $\chi = 0.1$, k = 4.5, $b_1 = 1.0$, $b_2 = 1.0$, $b_3 = 1.0$, $\theta_0 = 1.0$, $z_0 = 40.0$, $c_1 = 0.1$.

В [5] рассматриваются уравнения с третьей и пятой степенями нелинейности в виде систем из двух уравнений, каждое из которых описывает распространение волны в двулучепреломляющем волокне. Двойным лучепреломлением называется эффект, при котором луч света в анизотропной среде расщепляется на две составляющих.

По аналогии с этой работой уравнению (1) соответствует следующая система:

$$iu_{t} + ic_{1}u_{x} + c_{2}u_{xx} + ic_{3}u_{xxx} + c_{4}u_{xxxx} + ic_{5}u_{xxxxx} + + c_{6}u_{xxxxx} + (c_{7}|u|^{2} + c_{8}|v|^{2})u + (c_{9}|u|^{4} + c_{10}|u|^{2}|v|^{2} + + c_{11}|v|^{4})u + (c_{12}|u|^{6} + 3c_{13}|u|^{4}|v|^{2} + 3c_{14}|u|^{2}|v|^{4} + + c_{15}|v|^{6})u + sv = 0, iv_{t} + id_{1}v_{x} + d_{2}v_{xx} + id_{3}v_{xxx} + d_{4}v_{xxxx} + id_{5}v_{xxxxx} + + d_{6}v_{xxxxxx} + (d_{7}|u|^{2} + d_{8}|v|^{2})v + (d_{9}|u|^{4} + d_{10}|u|^{2}|v|^{2} + + d_{11}|v|^{4})v + (d_{12}|u|^{6} + 3d_{13}|u|^{4}|v|^{2} + 3d_{14}|u|^{2}|v|^{4} +$$
(4)

$$+ d_{15}|v|^6)v + ru = 0,$$

однако, в (3)-(4) учтены добавочные слагаемые ru и sv, отвечающие за отражательные свойства волн.

Уравнения, входящие в систему (3)–(4), являются нелинейными дифференциальными уравнениями 6-го порядка, учитывающими высокий уровень дисперсии. Уравнения с высокой дисперсией ранее также рассматривались в работах [7–12].

В данной работе ищутся точные решения системы (3)–(4) после ее первоначального перехода к переменным бегущей волны.

2. ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ (3)–(4) ПРИ $b_3 \neq 0$

Используя переменные бегущей волны

$$u(x,t) = y_1(z)e^{i(kx-kx_0-\omega t)}, \ v(x,t) = y_2(z)e^{i(kx-kx_0-\omega t)}, \ (5)$$
$$z = x - C_0 t,$$

преобразуем уравнения в частных производных системы (3)–(4) в систему обыкновенных дифференциальных уравнений.

Подставляя (5) в систему (3)–(4), получаем систему из четырех уравнений, представляющих собой действительную и мнимую части исходных уравнений:

.

$$y_{1,zzzzz}c_{6} + (-15k^{2}c_{6} - 5kc_{5} + c_{4})y_{1,zzzz} + (15k^{4}c_{6} + 10k^{3}c_{5} - 6k^{2}c_{4} - 3kc_{3} + c_{2})y_{1,zz} + y_{1}^{7}c_{12} + (3c_{13}y_{2}^{2} + c_{9})y_{1}^{5} + (3c_{14}y_{2}^{4} + c_{10}y_{2}^{2} + c_{7})y_{1}^{3} + (6) + (-k^{6}c_{6} + c_{15}y_{2}^{6} - k^{5}c_{5} + k^{4}c_{4} + c_{11}y_{2}^{4} + k^{3}c_{3} - k^{2}c_{2} + c_{8}y_{2}^{2} - kc_{1} + \omega)y_{1} + sy_{2} = 0,$$

$$(6kc_6 + c_5)y_{1,zzzz} + (-20k^3c_6 - 10k^2c_5 + 4kc_4 + c_3)y_{1,zz} + (6k^5c_6 + 5k^4c_5 - 4k^3c_4 - 3k^2c_3 + (7) + 2kc_2 - C_0 + c_1)y_1 = 0,$$

$$y_{2,zzzzz}d_{6} + (-15k^{2}d_{6} - 5kd_{5} + d_{4})y_{d,zzzz} + (15k^{4}d_{6} + 10k^{3}d_{5} - 6k^{2}d_{4} - 3kd_{3} + d_{2})y_{2,zz} + y_{2}^{7}d_{15} + (3d_{14}y_{1}^{2} + d_{11})y_{2}^{5} + (3d_{13}y_{1}^{4} + d_{10}y_{1}^{2} + d_{8})y_{2}^{3} + (8)$$

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

+
$$(-k^{6}d_{6} + d_{12}y_{1}^{6} - k^{5}d_{5} + k^{4}d_{4} + d_{9}y_{1}^{4} + k^{3}d_{3} - k^{2}d_{2} + d_{7}y_{1}^{2} - kd_{1} + \omega)y_{2} + ry_{1} = 0,$$

$$(6kd_6 + d_5)y_{2,zzzz} + (-20k^3d_6 - 10k^2d_5 + 4kd_4 + + d_3)y_{2,zz} + (6k^5d_6 + 5k^4d_5 - 4k^3d_4 - 3k^2d_3 + + 2kd_2 - C_0 + d_1)y_2 = 0.$$
(9)

Система уравнений (6)–(9) является переопределенной для функций $y_1(z)$ и $y_2(z)$, при этом уравнения (6)–(7) получены из первого уравнения исходной системы (3)–(4), а (8)–(9) – из второго. Полагая коэффициенты мономов уравнений (7) и (9) равными нулю, получим, что любые функции $y_1(z)$ и $y_2(z)$ будут удовлетворять уравнениям (7) и (9) соответственно. Далее рассматриваем уравнения (6) и (8), с учетом ограничений, полученных из уравнения (7), которые имеют вид:

$$c_{5} = -6c_{6}k,$$

$$c_{3} = -40c_{6}k^{3} - 4c_{4}k,$$

$$c_{1} = -96c_{6}k^{5} - 8c_{4}k^{3} - 2c_{2}k + C_{0},$$
(10)

и ограничений, полученных аналогично из равенства нулю коэффициентов мономов уравнения (9):

$$d_{5} = -6d_{6}k,$$

$$d_{3} = -40d_{6}k^{3} - 4d_{4}k,$$

$$d_{1} = -96d_{6}k^{5} - 8d_{4}k^{3} - 2d_{2}k + C_{0}.$$
(11)

Тогда, с учетом (10) и (11), уравнения (6) и (8) принимают вид:

$$y_{1,zzzzz}c_{6} + (15k^{2}c_{6} + c_{4})y_{1,zzzz} + (75k^{4}c_{6} + 6k^{2}c_{4} + c_{2})y_{1,zz} + y_{1}^{7}c_{12} + 3y_{1}^{5}y_{2}^{2}c_{13} + y_{1}^{5}c_{9} + 3y_{1}^{3}y_{2}^{4}c_{14} + y_{1}^{3}y_{2}^{2}c_{10} + y_{1}^{3}c_{7} + 61y_{1}k^{6}c_{6} + y_{1}y_{2}^{6}c_{15} + 5y_{1}k_{4}^{c} + y_{1}y_{2}^{4}c_{11} + y_{1}y_{2}^{2}c_{8} + (k^{2}c_{2} - C_{0}k + \omega)y_{1} + sy_{2} = 0,$$

$$y_{2,zzzzz}d_{6} + (15k^{2}d_{6} + d_{4})y_{2,zzzz} + (75k^{4}d_{6} + 6k^{2}d_{4} + d_{2})y_{2,zz} + y_{2}^{7}d_{15} + 3y_{2}^{5}y_{1}^{2}d_{14} + y_{2}^{5}d_{11} + 3y_{2}^{3}y_{1}^{4}d_{13} + y_{2}^{3}y_{1}^{2}d_{10} + y_{2}^{3}d_{8} + 61y_{2}k^{6}d_{6} + (13) + y_{2}y_{1}^{6}d_{12} + 5y_{2}k^{4}d_{4} + y_{2}y_{1}^{4}d_{9} + y_{2}y_{1}^{2}d_{7} + (k^{2}d_{2} - C_{0}k + \omega)y_{1} + ry_{1} = 0.$$

Уравнения в системе (12)–(13) также являются нелинейными дифференциальными уравнениями 6-го порядка. В полученной системе (12)–(13) воспользуемся заменой:

$$y_1(z) = A_0 + A_1 R(z), y_2(z) = B_0 + B_1 R(z).$$
 (14)

Далее, без ограничения общности полагаем, что $A_0 = B_0 = 0$.

Тогда после подстановки (14) в (12)—(13) получаем переопределенную систему уравнений относительно функции R(z)

$$\begin{aligned} A_{1}R_{zzzzzz}c_{6} + A_{1}(15k^{2}c_{6} + c_{4})R_{zzzz} + A_{1}(75k^{4}c_{6} + 6k^{2}c_{4} + c_{2})R_{zz} + A_{1}(A_{1}^{6}c_{12} + 3A_{1}^{4}B_{1}^{2}c_{13} + 3A_{1}^{2}B_{1}^{4}c_{14} + B_{1}^{6}c_{15})R^{7} + A_{1}(A_{1}^{4}c_{9} + A_{1}^{2}B_{1}^{2}c_{10} + (15) \\ &+ B_{1}^{4}c_{11})R^{5} + A_{1}(A_{1}^{2}c_{7} + B_{1}^{2}c_{8})R^{3} + ((61k^{6}c_{6} + 5k^{4}c_{4} + k^{2}c_{2} - kC_{0} + \omega)A_{1} + B_{1}s)R = 0, \\ B_{1}R_{zzzzz}d_{6} + B_{1}(15k^{2}d_{6} + d_{4})R_{zzzz} + B_{1}(75k^{4}d_{6} + 6k^{2}d_{4} + d_{2})R_{zz} + B_{1}(A_{1}^{6}d_{12} + 3A_{1}^{4}B_{1}^{2}d_{13} + 3A_{1}^{2}B_{1}^{4}d_{14} + B_{1}^{6}d_{15})R^{7} + B_{1}(A_{1}^{4}d_{9} + A_{1}^{2}B_{1}^{2}d_{10} + (16) \\ &+ B_{1}^{4}d_{11})R^{5} + B_{1}(A_{1}^{2}d_{7} + B_{1}^{2}d_{8})R^{3} + ((61k^{6}d_{6} + 5k^{4}d_{4} + k^{2}d_{2} - kC_{0} + \omega)B_{1} + A_{1}r)R = 0. \end{aligned}$$

В полученной системе (15)–(16) умножим первое уравнение на d_6B_1 , второе – на c_6A_1 , и вычтем из первого уравнения (15) второе (16):

$$P_1 R_{zzzz} + P_2 R_{zz} + P_3 R^7 + P_4 R^5 + P_5 R^3 + P_6 R = 0,$$
 (17)
где

$$P_1 = A_1 B_1 (c_4 d_6 - c_6 d_4), \tag{18}$$

$$P_{2}k_{1}A_{1}\left(\left(-k^{2}d_{4}-\frac{d_{2}}{6}\right)c_{6}+d_{6}\left(k^{2}c_{4}+\frac{c_{2}}{6}\right)\right),$$
 (19)

$$P_{3} = A_{1}B_{1}((c_{12}d_{6} - c_{6}d_{12})A_{1}^{6} + 3B_{1}^{2}(c_{13}d_{6} - c_{6}d_{13})A_{1}^{4} + + 3B_{1}^{4}(c_{14}d_{6} - c_{6}d_{14})A_{1}^{2} + B_{1}^{6}(c_{15}d_{6} - c_{6}d_{15})),$$
(20)

$$P_{4} = A_{1}B_{1}((c_{9}d_{6} - c_{6}d_{9})A_{1}^{4} + B_{1}^{2}(c_{10}d_{6} - c_{6}d_{10})A_{1}^{2} + B_{1}^{4}(c_{11}d_{6} - c_{6}d_{11})),$$
(21)

$$P_5 = A_1 B_1 ((c_7 d_6 - c_6 d_7) A_1^2 + B_1^2 (c_8 d_6 - c_6 d_8)), \quad (22)$$

$$P_{6} = B_{1}^{2}d_{6}s - A_{1}^{2}c_{6}r + A_{1}B_{1}((kC_{0} - 5k^{4}d_{4} - c_{6}k^{2}d_{2} - \omega)c_{6} + (5k^{4}d_{4} + k^{2}c_{2} - kC_{0} + \omega)d_{6}).$$
(23)

Решая уравнения $P_i = 0, i = \overline{1, 6}$, находим искомые условия совместности для системы уравнений (15)–(16):

$$\frac{c_2}{d_2} = \frac{c_4}{d_4} = \frac{c_6}{d_6} = h,$$
(24)

$$c_{7} = \frac{1}{A_{1}^{2}(A_{1}^{6}d_{12} + 3A_{1}^{4}B_{1}^{2}d_{13} + 3A_{1}^{2}B_{1}^{4}d_{14} + B_{1}^{6}d_{15})} \times (A_{1}^{8}c_{12}d_{7} - B_{1}^{2}(c_{8}d_{12} - c_{12}d_{8} - 3c_{13}d_{7})A_{1}^{6} - 3B_{1}^{4}(c_{8}d_{13} - c_{13}d_{8} - c_{14}d_{7})A_{1}^{4} - (3d_{14}c_{8} - d_{7}c_{15} - (25))$$

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

$$-3d_8c_{14})B_1^6A_1^2-B_1^8(c_8d_{15}-c_{15}d_8)),$$

 $c_9 = \frac{1}{A_1^2 (A_1^6 d_{12} + 3A_1^4 B_1^2 d_{13} + 3A_1^2 B_1^4 d_{14} + B_1^6 d_{15})} \times$ $\times (A_1^{10}c_{12}d_9 + B_1^2(-c_{10}d_{12} + c_{12}d_{10} + 3c_{13}d_9)A_1^8 +$

$$+ (3c_{13}d_{10} + c_{12}d_{11} - c_{11}d_{12} - 3c_{10}d_{13} + + 3c_{14}d_9)B_1^4A_1^6 + (3c_{14}d_{10} + 3d_{11}c_{13} - 3d_{13}c_{11} - - 3d_{14}c_{10} + c_{15}d_9)B_1^6A_1^4 + B_1^8(-d_{15}c_{10} - 3d_{14}c_{11} + + 3c_{14}d_{11} + c_{15}d_{10})A_1^2 + B_1^{10}(c_{15}d_{11} - c_{11}d_{15})),$$
(26)

$$\omega = \frac{-rc_{12}A_{1}^{8} - kC_{0}B_{1}(d_{12} - c_{12})A_{1}' + B_{1}^{2}(sd_{12} - 3rc_{13})A_{1}^{6} - A_{1}B_{1}((c_{12} - d_{12})A_{1}^{6} - 3B_{1}^{2}(d_{13} - c_{13})A_{1}^{4} - A_{1}B_{1}((c_{12} - d_{12})A_{1}^{6} - 3B_{1}^{2}(d_{13} - c_{13})A_{1}^{4} - A_{1}B_{1}(d_{13} - c_{14})A_{1}^{4} - A_{1}B_{1}(d_{14} - c_{14})A_{1}^{3} - A_{1}B_{1}^{4}(d_{14} - c_{14})A_{1}^{2} + A_{1}B_{1}^{6}(rc_{15} - 3sd_{14})A_{1}^{2} + kC_{0}B_{1}^{7}(c_{15} - d_{15})A_{1} - sB_{1}^{8}d_{15}, +B_{1}^{6}(c_{15} - d_{15}))$$
(27)

где

$$h = \frac{A_1^6 c_{12} + 3A_1^4 B_1^2 c_{13} + 3A_1^2 B_1^4 c_{14} + B_1^6 c_{15}}{A_1^6 d_{12} + 3A_1^4 B_1^2 d_{13} + 3A_1^2 B_1^4 d_{14} + B_1^6 d_{15}}.$$

С учетом найденных условий, далее можно рассматривать любое уравнение из системы (15)-(16). Ниже приводится решение уравнения (15).

Решение будем искать в виде:

$$R(z) = \gamma_0 + \gamma_1 F(z), \qquad (28)$$

где F(z) – решение уравнения $F_z^2 = F^2(1 - \chi F^2)$ и имеет вил:

$$F(z) = \frac{4ae^{\alpha(z-z_0)}}{4a^2e^{2\alpha(z-z_0)} + \chi}.$$
 (29)

Без ограничения общности полагаем $\gamma_0 = 0$. Тогда, подставляя (28) в уравнение (15), имеем:

$$Q_1F^7 + Q_2F^5 + Q_3F^3 + Q_4F = 0, (30)$$

где

$$Q_{1} = d_{12}\gamma_{1}^{6}A_{1}^{6} + 3d_{13}\gamma_{1}^{6}A_{1}^{4}B_{1}^{2} + 3d_{14}\gamma_{1}^{6}A_{1}^{2}B_{1}^{4} + d_{15}\gamma_{1}^{6}B_{1}^{6} - d_{6}\chi^{3},$$
(31)

$$Q_{2} = d_{11}\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4} + d_{10}\gamma_{1}^{4}B_{1}^{2}A_{1}^{2} + d_{9}\gamma_{1}^{4}A_{1}^{4} + ((360k^{2} + 840)d_{6} + 24d_{4})\chi^{2},$$
(32)

$$Q_{3} = d_{8}\gamma_{1}^{2}B_{1}^{2} + d_{7}\gamma_{1}^{2}A_{1}^{2} -$$

$$9) -150\chi \left(\left(k^{4} + 2k^{2} + \frac{91}{75}\right)d_{6} + \frac{2k^{2}d_{4}}{25} + \frac{2d_{4}}{15} + \frac{d_{2}}{75} \right),$$
(33)

$$Q_{4} = \frac{d_{15}sB_{1}^{8} + \eta A_{1}(c_{15} - d_{15})B_{1}^{7} - A_{1}^{2}(rd_{15} - 3sd_{14})B_{1}^{6} +}{B_{1}((c_{15} - d_{15})B_{1}^{6} + 3A_{1}^{2}(c_{14} - d_{14})B_{1}^{4} +}$$

$$\frac{+3\eta A_{1}^{3}(c_{14} - d_{14})B_{1}^{5} - 3A_{1}^{4}(rd_{14} - sd_{13})B_{1}^{4} + 3\eta(c_{13} - d_{13})a_{1}^{5}B_{1}^{3} -}{+3A_{1}^{4}(c_{13} - d_{13})B_{1}^{2} +}$$

$$\frac{-(3rd_{13} - sd_{12})A_{1}^{6}B_{1}^{2} + \eta(c_{12} - d_{12})A_{1}^{7}B_{1} - rd_{12}A_{1}^{8})}{+A_{1}^{6}(c_{12} - d_{12})},$$
(34)

где

$$\eta = ((61k^4 + 14k^2 + 1)d_6 + 5k^2d_4 + d_4 + d_2)(k^2 + 1).$$

Из уравнений вида $Q_i = 0, i = \overline{1,4}$ найдем дополнительные ограничения на параметры d_2, d_4, d_6, d_9 :

$$d_{2} = \frac{1}{G} (9(c_{12} - d_{12})\gamma_{1}^{6}B_{1}d_{12}A_{1}^{13}f_{1}(k) + 27((c_{13} - 2d_{13}) \times d_{12} + c_{12}d_{13})\gamma_{1}^{6}B_{1}^{3}A_{1}^{11}f_{1}(k) + 27(((c_{14} - 2d_{14})d_{12} + c_{12}d_{14} + 3c_{13}d_{13} - 3d_{13}^{2})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{1}(k) - \frac{200}{3}d_{7}(c_{12} - d_{12})\chi^{2}(k^{2} + \frac{1}{5})(k^{2} + 1))\gamma_{1}^{2}B_{1}A_{1}^{9} +$$

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 Nº 3 2020

$$+4320\left(k^{2}+\frac{5}{3}\right)r\chi^{3}d_{12}A_{1}^{8}+\left(\left(c_{15}-2d_{15}\right)d_{12}+\left(9c_{14}-18d_{14}\right)\times\right)\chi^{2}\left(k^{2}+\frac{1}{5}\right)\left(k^{2}+1\right)\right)\times$$

$$\times d_{13}+c_{12}d_{15}+9c_{13}d_{14}\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{1}(k)-200(c_{12}d_{8}+3c_{13}d_{7}-3d_{7}d_{13}-d_{8}d_{12})\chi^{2}\left(k^{2}+\frac{1}{5}\right)\left(k^{2}+1\right)\right)\times$$

$$\times \gamma_{1}^{2}B_{1}^{3}A_{1}^{7}-4320(sd_{12}-3rd_{13})\times\left(k^{2}+\frac{5}{3}\right)\chi^{3}B_{1}^{2}A_{1}^{6}+27\gamma_{1}^{2}\left(\left(c_{15}-2d_{15}\right)d_{13}+c_{13}d_{15}+3c_{14}d_{14}-3d_{14}^{2}\right)\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{1}(k)-200\chi^{2}(c_{13}d_{8}+4)$$

$$(35)$$

$$+ c_{14}d_{7} - d_{7}d_{14} - d_{8}d_{13})\left(k^{2} + \frac{1}{5}\right)(k^{2} + 1)\left(k^{2} + 1\right)B_{1}^{5}A_{1}^{5} - 12960(sd_{13} - rd_{14})\left(k^{2} + \frac{5}{3}\right)\chi^{3}\left(sd_{14} - \frac{rd_{15}}{3}\right)B_{1}^{6}A_{1}^{2} + 9\left(d_{15}\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{1}(k) - 200d_{8}\chi^{2}\left(k^{2} + \frac{1}{5}\right)(k^{2} + 1)\right)(c_{15} - d_{15}\gamma_{1}^{2}B_{1}^{9}A_{1}) - 4320d_{15}s\left(k^{2} + \frac{5}{3}\right)\chi^{3}B_{1}^{8}\right),$$

$$d_{4} = \frac{1}{G}\left(-7(c_{12} - d_{12})\gamma_{1}^{6}B_{1}d_{12}A_{1}^{13}f_{2}(k) - 21((c_{13} - 2d_{13})d_{12} + c_{12}d_{13})\gamma_{1}^{6}B_{1}^{3}A_{1}^{11}f_{2}(k) - 21\left(((c_{14} - 2d_{14})d_{12} + c_{12}d_{14} + 3c_{13}d_{13} - 3d_{13}^{2})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{2}(k) - \frac{60}{7}d_{7}(c_{12} - d_{12})\chi^{2}(k^{2} + 1)\right)\gamma_{1}^{2}B_{1}A_{1}^{9} - 360rd_{12}A_{1}^{8}\chi^{3} - 7\left(\left((c_{15} - 2d_{15})d_{12} + (9c_{14} - 18d_{14})d_{13} + c_{12}d_{15} + 9c_{13}d_{14})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{2}(k) - \frac{180}{7}(c_{12}d_{8} + 3c_{13}d_{7} - 3d_{7}d_{13} - d_{8}d_{12})\chi^{2}(k^{2} + 1)\right)\gamma_{1}^{2}B_{1}A_{1}^{7} + 360(sd_{12} - 3rd_{13})\chi^{3}B_{1}^{2}A_{1}^{6} - 21\gamma_{1}^{2}\left(((c_{15} - 2d_{15})d_{13} + c_{13}d_{15} + 3c_{14}d_{14} - (36)\right)$$

$$-3d_{14}^{2}\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{2}(k) - \frac{180}{7}\chi^{2}(c_{13}d_{8} + c_{14}d_{7} - d_{7}d_{14} - d_{8}d_{13})(k^{2} + 1)\Big)B_{1}^{5}A_{1}^{5} + 1080\chi^{3}B_{1}^{4}(sd_{13} - rd_{14})A_{1}^{4} - 21\Big(((c_{15} - 2d_{15})d_{14} + c_{14}d_{15})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{2}(k) - \frac{180}{7}\chi^{2}\Big(c_{14}d_{8} + \frac{1}{3}c_{15}d_{7} - d_{14}d_{8} - \frac{1}{3}d_{15}d_{7}\Big)(k^{2} + 1))\gamma_{1}^{2}B_{1}^{7}A_{1}^{3} + 1080\Big(sd_{14} - \frac{rd_{15}}{3}\Big)\chi^{3}B_{1}^{6}A_{1}^{2} - (7d_{15}\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{2}(k) - 180\chi^{2}d_{8}(k^{2} + 1))(c_{15} - d_{15})\gamma_{1}^{2}B_{1}^{9}A_{1} + 360d_{15}sB_{1}^{8}\chi^{3}\Big) \\ d_{6} = \frac{\gamma_{1}^{6}(A_{1}^{6}d_{12} + 3A_{1}^{4}B_{1}^{2}d_{13} + 3A_{1}^{2}B_{1}^{4}d_{14} + B_{1}^{6}d_{15})}{720\chi^{3}},$$

$$(37)$$

$$d_{9} = (-(c_{12} - d_{12})\gamma_{1}^{6}B_{1}d_{12}A_{1}^{13}f_{3}(k) - 3((c_{13} - 2d_{13})d_{12} + c_{12}d_{13})\gamma_{1}^{6}B_{1}^{3}A_{1}^{11}f_{3}(k) - 3\gamma_{1}^{2}(((c_{14} - 2d_{14})d_{12} + c_{12}d_{14} + 3c_{13}d_{13} - 3d_{13}^{2})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{3}(k) + 10d_{10}\gamma_{1}^{2}\chi(k^{2} + 9)(c_{12} - d_{12})(k^{2} + 1)B_{1}^{2} + 12d_{7}(c_{12} - d_{12})\chi^{2}(k^{2} + 1))B_{1}A_{1}^{9} + 720rd_{12}A_{1}^{8}\chi^{3} - (((c_{15} - 2d_{15})d_{12} + (9c_{14} - 18d_{14})d_{13} + c_{12}d_{15} + 9c_{13}d_{14})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{3}(k) + 30\gamma_{1}^{2}\chi(k^{2} + 9)(c_{12}d_{11} + 3c_{13}d_{10} - 3d_{10}d_{13} - d_{11}d_{12})B_{1}^{2}(k^{2} + 1) + 360(c_{12}d_{8} + 3c_{13}d_{7} - 3d_{7}d_{13} - d_{8}d_{12})\chi^{2}(k^{2} + 1))\gamma_{1}^{2}B_{1}^{3}A_{1}^{7} - 720\chi^{3}B_{1}^{2}(sd_{12} - 3rd_{13})A_{1}^{6} - 3(((c_{15} - 2d_{15})d_{13} + c_{13}d_{15} + 3c_{14}d_{14} - 3d_{12}^{2})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{3}(k) + 30\gamma_{1}^{2}\chi(k^{2} + 9)(c_{13}d_{11} + c_{14}d_{10} - d_{10}d_{14} - d_{11}d_{13})B_{1}^{2}(k^{2} + 1) + 360\chi^{2}(c_{13}d_{8} + c_{14}d_{7} - d_{7}d_{14} - d_{8}d_{13}))\gamma_{1}^{2}B_{1}^{5}A_{1}^{5} - 2160\chi^{3}B_{1}^{4}(sd_{13} - rd_{14}) - 3\left(((c_{15} - 2d_{15})d_{14} + c_{14}d_{15})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{3}(k) + 30(k^{2} + 9)\gamma_{1}^{2}\chi(c_{14}d_{11} + \frac{1}{3}c_{15}d_{10} - \frac{1}{3}d_{10}d_{15} - d_{11}d_{14}) \times B_{1}^{2}(k^{2} + 1) + 360\chi^{2}(c_{13}d_{8} + c_{14}d_{7} - d_{7}d_{14} - d_{8}d_{13}))\gamma_{1}^{2}B_{1}^{5}A_{1}^{5} - 2160\chi^{3}B_{1}^{4}(sd_{13} - rd_{14}) - 3\left(((c_{15} - 2d_{15})d_{14} + c_{14}d_{15})\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{3}(k) + 30(k^{2} + 9)\gamma_{1}^{2}\chi(c_{14}d_{11} + \frac{1}{3}c_{15}d_{10} - \frac{1}{3}d_{10}d_{15} - d_{11}d_{14}) \times B_{1}^{2}(k^{2} + 1) + 360\chi^{2}(c_{14}d_{8} + \frac{1}{3}c_{15}d_{7} - d_{14}d_{8} - \frac{1}{3}d_{15}d_{7}\right)(k^{2} + 1))\gamma_{1}^{2}B_{1}^{7}A_{1}^{3} - 2160\left(sd_{14} - \frac{rd_{15}}{3}\right)\chi^{3}B_{1}^{6}A_{1}^{2} - (c_{15} - d_{15})(d_{15}\gamma_{1}^{4}B_{1}^{4}f_{3}(k) + 30d_{11}\gamma_{1}^{2}\chi(k^{2} + 9)B_{1}^{2}(k^{2} + 1) + 360\chi^{2}d_{8}(k^{2} + 1))\gamma_{1}^{2}B_{1}^{9}A_{1} - 720d_{15}sB_{1}^{8}\chi^{3})/(30((c_{15} - d_{15})B_{1}^$$

где

$$f_{1}(k) = (k^{2} + 9)(k^{2} + 1)\left(k^{4} + \frac{50}{9}k^{2} + 1\right),$$

$$f_{2}(k) = (k^{2} + 9)(k^{2} + 1)\left(k^{2} + \frac{5}{7}\right),$$

$$f_{3}(k) = (k^{2} + 9)(k^{2} + 1)(k^{2} + 25),$$

$$G = 720A_{1}(k^{2} + 9)((c_{15} - d_{15})B_{1}^{6} + 3A_{1}^{2}(c_{14} - d_{14})B_{1}^{4} + 3A_{1}^{4}(c_{13} - d_{13})B_{1}^{2} + A_{1}^{6}(c_{12} - d_{12}))\chi^{3}(k^{2} + 1)B_{1}.$$

Таким образом, решение первого уравнения из системы уравнений (15)–(16) в форме уединенной волны имеет вид:

$$R(z) = \pm \frac{4a\gamma_1}{4a^2 e^{\alpha z} + \chi e^{-\alpha z}},$$
(39)

соответственно,

$$y_{1}(z) = \pm \frac{4aA_{1}\gamma_{1}}{4a^{2}e^{\alpha z} + \chi e^{-\alpha z}}, y_{2}(z) = \pm \frac{4aB_{1}\gamma_{1}}{4a^{2}e^{\alpha z} + \chi e^{-\alpha z}}.$$
(40)

Тогда решение исходной системы уравнений (3)–(4) можем записать в форме:

$$u(x,t) = \pm \frac{4a\gamma_{1}A_{1}e^{i(-kx+\omega t+\theta_{0})}}{4a^{2}e^{\alpha(x-vt-z_{0})} + \chi e^{-\alpha(x-vt-z_{0}))}},$$

$$v(x,t) = \pm \frac{4a\gamma_{1}B_{1}e^{i(-kx+\omega t+\theta_{0})}}{4a^{2}e^{\alpha(x-vt-z_{0})} + \chi e^{-\alpha(x-vt-z_{0}))}}.$$
(41)

Ниже представлены графики уединенных волн $y_1(z)$ и $y_1(z)$ и вещественной части u(x,t) и v(x,t).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается система двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных 6-го порядка, описывающая распространение двух волн с учетом брэгговской решетки. Показано существование высокодисперсных оптических солитонов, являющихся решением системы (3)–(4). Определены условия совместности исследуемой системы уравнений и, с учетом найденных ограничений получены точные решения системы дифференциальных уравнений (3)–(4) при условии, что $b_3 \neq 0$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-10025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kudryashov N.A. A generalized model for description of propagation pulses in optical fiber // Optik. 2019. V. 189. P. 42–52.
- Kudryashov N.A. Construction of nonlinear differential equations for description of propagation pulses in optical fiber // Optik. 2019. V. 192. P. 162964.
- 3. *Kudryashov N.A.* Solitary and periodic waves of the hierarchy for propagation pulse in optical fiber // Optik. 2019. V. 194. P. 163060.
- 4. *Варжель С.В.* Волоконные брэгговские решетки. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
- 5. *Yildirim Yakup et al.* Cubic–quartic optical solitons in birefringent fibers with four forms of nonlinear refractive index by exp–function expansion // Results in Physics. 2020. 102913.
- Biswas, Anjan et al. Highly dispersive optical solitons with cubic-quintic-septic law by F-expansion // Optik. V. 182. P. 897–906.
- 7. *Kudryashov N.A.* Highly dispersive optical solitons of the generalized nonlinear eighth-order Schrödinger equation // Optik. 2020. V. 206. P. 164335.
- Kudryashov N.A. Highly dispersive solitary wave solutions of perturbed nonlinear Schrödinger equations // Applied Mathematics and Computation. 2020. V. 371. P. 124972.
- Biswas, Anjan et al. Highly dispersive optical solitons with undetermined coefficients // Optik. 2019. V. 182. P. 890–896.
- Biswas, Anjan et al. Highly Dispersive Optical Solitons With Kerr Law Nonlinearity by F-Expansion // Optik. 2019. V. 181. P. 1028–1038.
- 11. *Biswas, Anjan et al.* Highly dispersive optical solitons with quadratic-cubic law by F-expansion // Optik. 2019. V. 182. P. 930–943.
- 12. *Кудряшов Н.А., Сафонова Д.В. //* "Точные решения нелинейного дифференциального уравнения для описания оптических импульсов с нелинейностью третьей и пятой степени" // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2020. Т. 9. № 1. С. 25–31.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 210-216

Highly Dispersive Solitons Described by the System of Nonlinear Differential Equations Including a Bragg Grating

K. V. Kan^{*a*,#} and N. A. Kudryashov^{*a*,##}

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia [#]e-mail: kan_13@mail.ru ^{##}e-mail: nakudr@gmail.com

Received July 30, 2020; revised July 30, 2020; accepted September 8, 2020

КАН, КУДРЯШОВ

Abstract—In nonlinear optics, great attention is currently paid to the analysis of nonlinear differential equations describing the propagation of solitary waves in optical media. In this work, the system of partial differential equations of the sixth order is studied to describe the propagation of two waves in a Bragg grating. This system includes nonlinearities of the third, fifth, and seventh degrees. To solve the problem, we apply the simplest equation method variance for finding solitary wave solutions. At the first step, the system is transformed to a system of ordinary differential equations by using the traveling wave variables. The resulting system is an overdetermined system consisting of four equations corresponding to the real and imaginary parts of the initial equations. From the equations are obtained. The pole order of the general solutions for the differential equations corresponding to the real parts is determined. This pole order allows us to use the simplest equations method to construct solutions in the form of solitary waves. Thus, the analytical solutions are constructed and graphs with different values of the mathematical model parameters are analyzed.

Keywords: Bragg grating, solitary waves, nonlinear differential equations, pulse propagation, optical fiber

DOI: 10.1134/S2304487X20030049

REFERENCES

- Kudryashov N.A. A generalized model for description of propagation pulses in optical fiber // Optik 189 (2019): 42–52.
- 2. *Kudryashov N.A.* Construction of nonlinear differential equations for description of propagation pulses in optical fiber // Optik 192 (2019): 162964.
- 3. *Kudryashov N.A.* Solitary and periodic waves of the hierarchy for propagation pulse in optical fiber // Optik 194 (2019): 163060.
- 4. *S.V. Varzhel*'. Volokonnye breggovskie reshetki. SPb: Universitet ITMO, 2015. – 65 p.
- 5. *Yildirim, Yakup et al.* Cubic–quartic optical solitons in birefringent fibers with four forms of nonlinear refractive index by exp–function expansion // Results in Physics (2020): 102913.
- Biswas, Anjan et al. Highly dispersive optical solitons with cubic-quintic-septic law by F-expansion // Optik. Vol. 182. pp. 897–906.

- 7. *Kudryashov N.A.* Highly dispersive optical solitons of the generalized nonlinear eighth-order Schrödinger equation // Optik 206 (2020): 164335.
- Kudryashov N.A. Highly dispersive solitary wave solutions of perturbed nonlinear Schrödinger equations // Applied Mathematics and Computation 371 (2020): 124972.
- 9. *Biswas, Anjan et al.* Highly dispersive optical solitons with undetermined coefficients // Optik 182 (2019): 890-896.
- Biswas, Anjan et al. Highly Dispersive Optical Solitons With Kerr Law Nonlinearity by F-Expansion // Optik 181 (2019) 1028–1038.
- 11. *Biswas, Anjan et al.* Highly dispersive optical solitons with quadratic-cubic law by F-expansion // Optik 182 (2019): 930–943.
- 12. *Kudryashov N.A., Safonova D.V.* // "Tochnye resheniya nelinejnogo differencial'nogo uravneniya dlya opisaniya opticheskih impul'sov s nelinejnost'yu tret'ej i pyatoj stepeni" // Vestnik Nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI T. 9. № 1 (2020): p. 25–31.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, c. 217-225

_ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ _____ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УЛК 621.039.548

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ЭХО-ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

© 2020 г. А. В. Воронина^{1,*}, С. В. Павлов¹

¹ Димитровградский инженерно-технологический институт филиал Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", Димитровград, 433507, Россия

> *e-mail: AVVoronina@mephi.ru Поступила в редакцию 27.03.2020 г. После доработки 02.07.2020 г. Принята к публикации 07.07.2020 г.

Рассмотрен принцип определения размеров при инспекции облученных ТВС ультразвуковым эхоимпульсным методом. Приведены факторы, влияющие на траекторию распространения ультразвука в среде и обусловленные наличием остаточного тепловыделения у ТВС. В приближении геометрической акустики разработана математическая модель акустического тракта ультразвукового датчика. Среда, в которой распространяется ультразвук, рассматривается в приближении плоскопараллельной слоистой среды жидкости с монотонным изменением температуры и плотности воды от слоя к слою. Предполагается, что температура воды между датчиками и поверхностью ТВС определяется конвективным теплообменом между ТВС и водой бассейна выдержки АЭС. Модель учитывает нестабильность скорости звука и рефракцию ультразвуковых волн при наклонном падении волн на поверхность. Предложенная авторами модель позволяет исследовать акустический тракт при ультразвуковом эхо-импульсном методе. Данную модель можно использовать при разработке систем контроля формоизменения ТВС ВВЭР-1000.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, ультразвук, ТВС, геометрическая акустика, рефракция DOI: 10.1134/S2304487X20030104

ВВЕДЕНИЕ

Одним из требований безопасности, предъявляемым к тепловыделяющим сборкам (ТВС), является геометрическая стабильность в течение всего срока эксплуатации в ядерном реакторе. Геометрическая стабильность, определяемая степенью формоизменения ТВС, зависит от механической жесткости и прочности конструкции ТВС, а также от воздействующих на ТВС факторов. При эксплуатации в активной зоне ядерного реактора ТВС подвержена воздействию нейтронного и гамма-излучения, градиентов температуры, статических и динамических нагрузок со стороны теплоносителя, окружающих ТВС и элементов конструкции реактора. При этом допускаются изменения формы и геометрических параметров ТВС, которые не оказывают существенного влияния на безопасность, в частности, не препятствуют штатной работе органов системы управления и защиты реактора; не затрудняют проведение транспортно-технологических операций с ТВС при их загрузке и выгрузке из активной зоны реактора; обеспечивают надежный теплоотвод от тепловыделяющих элементов (твэлов) к теплоносителю.

Об изменении формы ТВС обычно судят по результатам их инспекции и исследований после эксплуатации, которые проводят с использованием специальных стендов инспекции на АЭС или в радиационно-защитных камерах в исследовательских центрах [1]. Для определения какоголибо геометрического параметра ТВС (длина, поперечный размер, величина прогиба и др.) с помощью различных измерительных систем и устройств [2] определяют координаты соответствующих базовых точек поверхности ТВС, в последующем вычисляя искомый геометрический параметр.

Измерение координат точек поверхности ТВС осуществляют различными неразрушающими методами: оптическими, электромагнитными, ультразвуковыми. При контроле ТВС на стендах инспекции в бассейнах выдержки АЭС, когда ТВС находится в воде, удобно использовать ультразвуковые методы контроля, отличающиеся простотой, экспрессностью выполнения, хоро-



Рис. 1. Общий вид ТВС ВВЭР-1000 (а) и ее поперечное сечение с ультразвуковыми датчиками (б): *1* – головка; *2* – решетка дистанционирующая; *3* – твэлы; *4* – хвостовик; *5* – датчик ультразвуковой.

шими метрологическими характеристиками и отсутствием прямого контакта с объектом контроля [3, 4].

Ультразвуковые эхо-импульсные методы измерения линейных размеров основаны на измерении времени распространения ультразвуковых волн от датчиков до объекта контроля и обратно с последующим вычислением расстояния между ними [5]. Метрологические характеристики ультразвукового эхо-импульсного метода во многом определяются параметрами акустического тракта, который определяется как путь, проходимый ультразвуковыми волнами от датчика до объекта контроля и обратно [6].

Акустический тракт при инспекции облученных ТВС в бассейнах выдержки АЭС зависит от условий распространения и отражения ультразвуковых волн (УЗ-волны) в среде вследствие наличия естественной конвекции вдоль поверхности TBC из-за ее остаточного тепловыделения.

В данной статье представлена разработанная математическая модель акустического тракта ультразвукового эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров ТВС. Модель разработана в приближении геометрической акустики и описывает время распространения УЗволн от датчика до поверхности ТВС и обратно с учетом: рефракции УЗ-волн в конвективном слое, изменяющейся скорости звука в воде вдоль траектории распространения УЗ-волн и с учетом наклонного падения УЗ-волн на поверхность ТВС.

ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Изменение формы и размеров ТВС в процессе облучения могут стать ограничивающим фактором безопасной эксплуатации реактора. Применительно к ТВС ядерных реакторов типа ВВЭР-1000 (рис. 1) контролируемыми параметрами, характеризующими формоизменение ТВС. являются: длина сборки, прогиб, угол скручивания и размер "под ключ". На рис. 2 представлены типичные кривые по результатам исследования геометрической стабильности конструкции ТВС на стендах инспекции. Изменения геометрических параметров ТВС в процессе эксплуатации проявляются в виде изгибных деформаций и деформации скручивания ТВС, изменению размера "под ключ" прогибу дистанционирующих решеток (ДР). Накопленная за время эксплуатации деформация может привести к механическим повреждениям ТВС при перегрузках активных зон и к ограничению свободного прохождения органов регулирования системы управления и защиты при эксплуатации.

Внедрение новых технических решений, таких как: уменьшение количества ДР, изменение конструкции твэла — уменьшение толщины оболочки, уменьшение диаметрального зазора между оболочкой и топливными таблетками, увеличение длины твэла, могут привести к изменению изгибной жесткости ВВЭР-1000 и требуют экспериментального обоснования [7]. На стендах инспекции в бассейнах выдержки АЭС использование в качестве измерительных систем ультразвукового эхо-импульсного метода повысит оперативность проведения измерений формоизменения ТВС.

Определение геометрических характеристик и формоизменения ТВС и ее элементов ультразвуковым эхо-импульсном методом основано на измерении расстояния от ультразвукового датчика до поверхности грани дистанционирующей ре-



Рис. 2. Пример представления результатов инспекции ТВС ВВЭР-1000: а – годограф вектора прогиба ТВС; б – модуль вектора прогиба ТВС [8].

шетки TBC и координатной привязке датчика к определенной точке на поверхности сборки.

Координаты точек поверхности ДР ТВС ультразвуковым эхо-импульсным методом определяются следующим образом. Ультразвуковой датчик излучает волны, которые распространяются от датчика до поверхности ТВС и после отражения регистрируются этим же датчиком. Измеряется время распространения волн τ и затем определяется расстояние от датчика до поверхности ТВС *X*:

$$X = \frac{c\tau}{2},\tag{1}$$

где c – скорость звука в среде распространения, M/c^2 , τ – измеренное время, с.

Вдоль акустической оси датчика откладывается вычисленное по формуле (1) расстояние и определяются координаты точки поверхности ТВС. Для каждого геометрического параметра установлен определенный набор точек поверхно-



Рис. 3. Особенность измерения времени прихода эхо-импульса.

сти TBC, знание пространственного положения которых относительно друг друга позволяет определить данный параметр.

Время поступления на датчик отраженного от поверхности сигнала равно сумме времени распространения УЗ-волн в среде τ_p и временного интервала $\Delta \tau_A$, связанного с конечной длительностью эхо-импульса. Из рис. З видно, что при увеличении уровня порога A_0 , по которому происходит измерение времени, временной интервал $\Delta \tau_A$ увеличивается. Таким образом, временной интервал $\Delta \tau_A$ прямо пропорционален периоду колебаний и зависит от уровня порога A_0 .

Вследствие наличия остаточного тепловыделения у облученной ТВС, вдоль поверхности образуется конвективный слой, возникают неоднородности в виде турбулентных вихрей. Если на пути УЗ-волны встречается неоднородность, масштаб которой значительно больше длины волны ультразвука, то УЗ-волна отклоняется в сторону. Если попадаются неоднородности, масштаб которых меньше длины волны, то луч рассеивается. Таким образом, вследствие неоднородности среды у поверхности ТВС условия распространения УЗ-волны постоянно изменяются, что приводит к флуктуации амплитуды принятых сигналов. На рис. 4 показана зависимость отношения среднеквадратичного отклонения амплитуды S(A) к значению средней амплитуды сигнала \overline{A} от числа Рэлея. характеризующего интенсивность процесса

лея, характеризующего интенсивность процесса конвекции. Представленные данные опубликованы в работе [9], посвященной экспериментальному исследованию влияния естественной конвекции на результаты измерения геометрических характеристик твэлов и ТВС. Видно, что с увеличением интенсивности конвекции флуктуации амплитуды сигнала увеличиваются. Это объясня-



Рис. 4. Зависимость среднеквадратичного отклонения амплитуды от числа Рэлея [9].

ется тем, что число вихрей, проходящих в единицу времени область акустического тракта, становится больше и, следовательно, число актов рассеяния и отклонения УЗ-волны увеличивается.

Наряду с неоднородностью среды на распространение УЗ-волны влияет нестабильность физических свойств потока. Вдоль поверхности ТВС формируется тепловой пограничный слой, толщиной δ_l , который характеризуется градиентом температур по нормали к поверхности и совпадает с направлением акустичестического тракта. Температура у поверхности ТВС медленно изменяется вдоль акустической оси датчика (рис. 5). Температурная зависимость скорости звука [10] вызывает рефракцию — отклонение траектории УЗ-волн в области пограничного слоя.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При измерении размеров в основном используют датчики с плоскими пьезоэлементами круглой формы, для которых структура поля достаточно хорошо изучена, как теоретически, так и экспериментально [6]. В акустическом поле преобразователя дискообразной формы выделяют две зоны: дальняя, в которой амплитуда изменяется с расстоянием, и ближняя, где амплитуда постоянна (рис. 6). Размер ближней зоны r_6 для датчика радиусом *R*, генерирующего ультразвуковые волны с частотой *f*, равен:

$$r_{\delta} = \frac{R^2 \cdot f}{c},$$

где c – скорость звука в среде распространения, M/c^2 .

Будем рассматривать систему, состоящую из пьезопреобразователя радиусом *R* и пластины, моделирующей в первом приближении поверх-



Рис. 5. Схема расположения датчика: 1 - поверхность грани ДР ТВС; 2 - направление теплового потока; 3 - датчик; 4 - направления распространения ультразвуковых волн; c(x), T(x) - профиль скорости звука и температуры вдоль акустической оси датчика соответственно, 5 - твэлы.



Рис. 6. Схема поля излучения на оси дискового пьезопреобразователя, радиусом *R*: r_{δ} – размер ближней зоны, Θ – угол расхождения.

ность грани ДР. Среда, в которой распространяется УЗ-волна, однородна: отсутствуют неоднородности вследствие турбулентности вблизи поверхности ТВС.

Распространение УЗ-волн в водной среде будем рассматривать в ближней зоне в приближении геометрической акустики. В пределах ближней зоны УЗ-волна представляется как совокупность параллельных лучей, энергия которых не будет выходить за пределы трубки, радиусом датчика R [11].

Приближение геометрической акустики применимо для нашего случая при выполнении следующих условий [12]:

1) Размеры отражающей поверхности должны быть не меньше эллипса с полуосями

$$a \ge \frac{1}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\lambda \cdot X}{1 + \cos 2\alpha}};$$
(2)

$$b \ge \sqrt{\frac{\lambda \cdot X}{1 + \cos 2\alpha}},\tag{3}$$

где λ — длина волны, м; *X* — расстояние от датчика до исследуемой поверхности; α — угол падения, град.



Рис. 7. Траектория распространения ультразвукового луча до наклонной поверхности: *1* – поверхность TBC; *2* – пьезопреобразователь; *3* – акустическая ось; α – угол наклона поверхности TBC.

2) Отражающая поверхность может иметь неровности (шероховатости) размером H, если выполняется условие:

$$2\mathrm{H}\cdot\cos\alpha\leq\frac{\lambda}{4}.$$
 (4)

Например, для датчика, радиусом R = 0.008 м, генерирующего УЗ-волны с частотой f = 5 МГц, длина волны составит $\lambda = 3 \times 10^{-4}$ м, размер ближней зоны будет равен $r_{\delta} = 0.21$ м. При $\alpha = 5$ град условия геометрической акустики согласно формулам (2)–(4) будут выполнены для отражающей поверхности с размерами не меньше эллипса с полуосями $a = 5.70 \times 10^{-3}$ м, $b = 5.68 \times 10^{-3}$ м и с шероховатостью не более 38×10^{-6} м. Таким образом, для выбранного радиуса датчика и частоты колебаний пьезопластины возможно использовать приближение геометрической акустики для моделирования акустического тракта эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров ТВС ВВЭР-1000.

С учетом вышеизложенного исследуем распространение УЗ-волны при прохождении описанной системы с учетом наклонного падения волны на поверхность и наличии градиента температур в среде.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим траекторию ультразвукового луча из точки A с координатами (*X*, *Y*) в процессе рас-

пространения УЗ-волны в среде. Полагаем, что координата X – это расстояние от пьезопреобразователя до пластины вдоль акустической оси, а координата Yлежит в диапазоне [-R; +R]. В случае наклонного падения в области пограничного слоя происходит искривление направления движения УЗ-волны, которое связано с рефракцией УЗ-волны в среде с градиентом температур (рис. 7).

Скорость звука в пограничном слое можно записать как функцию температуры c(T(x)) и тогда уравнение эйконала будет иметь вид:

$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y}\right)^2 = \mu^2 = \left(\frac{c(T_{\infty})}{c(T(x))}\right)^2, \tag{5}$$

где: $c(T_{\infty})$ — постоянное значение скорости звука при температуре T_{∞} воды в бассейне выдержки вдали от TBC, м/с.

Тогда синус угла ф между направлением УЗ-волны и нормалью к наклонной стенке будет равен:

$$\sin \varphi = \frac{\partial \psi}{\partial y} / \sqrt{\left(\frac{\partial \psi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial y}\right)^2}.$$
 (6)

Полагая $\partial \psi / \partial y = \sin \alpha$, где α — угол наклона пластины, то из (5) и (6):

$$\sin \varphi = \frac{c(T(x))}{c(T_{\infty})} \cdot \sin \alpha.$$
⁽⁷⁾

Из этой формулы видно, что если dT/dx > 0, то угол φ будет увеличиваться, а если dT/dx < 0 то угол φ будет уменьшаться. Таким образом, вычисляется траектория распространения УЗ-волны в пограничном слое, если известно распределение температуры в нем.

Время распространения волны вдоль луча из точки А в точку С составит:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta \tau_A, \qquad (8)$$

где τ_1 — время распространения УЗ-волны от датчика до пограничного слоя; τ_2 — время распространения УЗ-волны в пограничном слое; τ_3 — время распространения отраженной УЗ-волны после прохождения пограничного слоя, $\Delta \tau_A$ — время, обусловленное способом регистрации эхо-импульса по его переднему фронту на уровне порога A_0 (см. рис. 3).

Считаем, что поворот пластины происходит в плоскости XY и центр вращения лежит на акустической оси датчика. Тогда расстояние от пьезопреобразователя до пластины X вдоль акустической оси датчика постоянно при любом угле наклона поверхности. Таким образом, расстояние L от точки A до поверхности при наклонном падении УЗ-волны можно определить, как:

$$L = X - Y \cdot tg\alpha.$$

Расстояние l_1 , которое проходит волна от датчика до пограничного слоя, составит:

$$l_1 = L - \frac{\delta_t}{\cos \alpha} = X - Y \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{\delta_t}{\cos \alpha}.$$
 (9)

Путь УЗ-волны в области пограничного слоя *l*₂ с учетом рефракции составит:

$$l_2 = 2 \cdot \int_0^{o_t} \frac{dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)}c(T(x))\right)^2}}.$$
 (10)

Для нахождения расстояния l_3 после прохождения УЗ-волной пограничного слоя рассмотрим $\Delta F''CE$ и $\Delta F'F''D$ на рис. 7. Тогда:

$$l_3 = \frac{F'F' \cdot \sin \alpha + l_1}{\cos 2\alpha}.$$
 (11)

Отклонение волны в области пограничного слоя FF'' (рис. 7) будет равно:

$$FF' = 2 \cdot \frac{\sin \alpha}{c(T_{\infty})} \cdot \int_{0}^{0_{t}} \frac{c(T(x))dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_{\infty})}c(T(x))\right)^{2}}}.$$
 (12)

Для определения времени $\Delta \tau_A$ рассмотрим затухающие колебания, описываемые функциональной зависимостью типа:

$$\Psi(\tau) = A_{\max} \cdot e^{-\beta\tau} \cdot \sin(\omega_{3a\tau}\tau), \qquad (13)$$

где A_{max} — максимальная амплитуда сигнала, β — коэффициент затухания, $\omega_{\text{зат}} = \sqrt{(2\pi f)^2 - \beta^2}$ — циклическая частота затухающих колебаний.

Допустим, что $\beta = 0$. Тогда из (13):

$$\Delta \tau_{\rm A} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k), \qquad (14)$$

где k – отношение амплитуды порога A_0 и A_{\max} .

С учетом вышеописанного, время распространения волны вдоль луча из точки А согласно формуле (8) составит:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta \tau_A =$$

$$= \frac{X - Y \cdot \operatorname{tg}\alpha - \frac{\delta_t}{\cos \alpha}}{c(T_{\infty})} \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) +$$

$$+ 2 \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x)) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_{\infty})}c(T(x))\right)^2}} + (15)$$

$$+ \frac{2\sin^2 \alpha}{c(T_{\infty})^2 \cos 2\alpha} \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{c(T(x))dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_{\infty})}c(T(x))\right)^2}} +$$

$$+ \frac{1}{2\pi f} \cdot \operatorname{arcsin}(k).$$

Таким образом, пользуясь формулой (15) можно определить время распространения ультразвукового луча из любой точки пьезоэлемента, находящейся в диапазоне [-R;+R].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанная модель позволяет оценить вклад различных факторов в погрешность измерения геометрических параметров TBC эхо-импульсным ультразвуковым методом, а также позволяет найти оптимальные технические решения при создании измерительной системы на базе таких ультразвуковых методов. Ниже приведены несколько примеров для иллюстрации использования модели.

На рис. 8 приведена экспериментальная зависимость дополнительной погрешности из-за изменения уровня порога A_0 , по которому происходит измерение времени распространения ультразвуковых волн (см. рис. 3). Частота колебаний fпьезопластины датчика в экспериментах равнялась 5.0 МГц. Сплошной линией на графиках обозначены результаты, полученные в ходе моделирования в условиях экспериментов. Расстояние от датчика до поверхности для вычисления погрешности определено по формуле (1). Видно,



Рис. 8. Зависимость погрешности от амплитуды порога A_0 : — результаты моделирования; \bigcirc – эксперимент.

что экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с результатами моделирования.

Результаты моделирования времени распространения ультразвукового луча из центра датчика вдоль акустической оси представлены на рис. 9а, 9б. Для моделирования выбран датчик радиусом R = 0.008 м, генерирующий ультразвуковые волны с частотой f = 5 МГц. Расстояние X принято равным $0.2r_6$. Исследовано перпендикулярное и наклонное падение на поверхность ТВС в условиях наличия естественной конвекции. При свободной конвекции профиль температуры в пограничном слое определяется режимом течения, который характеризуется безразмерным числом Рэлея Ra. Методика определения параметров теплообмена, в том числе изменения скорости УЗ-волны и температуры в воде, представлена в работе [13]. Методика расчета процесса теплообмена строится на предположении, что поверхность TBC можно представить в виде вертикальной пластины с постоянным тепловым потоком через нее. Расчеты проведены для пластины высотой 4 м с плотностью теплового потока равным 3 кВт/м². Температура воды в бассейне выдержки принята 30°С.

Из представленных данных (рис. 9, а) видно, что с увеличением степени турбулентности у поверхности ТВС (с увеличением Ra) измеренное время прохождения ультразвукового луча будет уменьшаться, что обусловлено зависимостью скорости звука от температуры. При измерении расстояния в случае наклонного падения луча на поверхность ТВС (рис. 9, б) время распространения увеличивается с увеличением угла наклона.

вывод

В работе рассмотрены факторы, влияющие на распространение ультразвука в воде при инспекции облученных ТВС ультразвуковым эхо-импульсным методом. Получена математическая модель акустического тракта в приближении геометрической акустики в пределах ближней зоны акустического поля датчика. Модель учитывает рефракцию УЗ-волн, нестабильность скорости



Рис. 9. Время распространения ультразвуковой волны при перпендикулярном (а) и при наклонном (б) падении на поверхность.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

звука вдоль траектории распространения УЗволн и наклонное падение волн на поверхность ТВС. Разработанная модель может быть использована при разработке систем контроля формоизменения ТВС ВВЭР-1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Павлов С.В. Методология материаловедческих исследований ТВС и ТВЭЛов ВВЭР для оперативного сопровождения внедрения нового топлива на АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2014. № 3. С. 25–34.
- 2. Павлов С.В., Сухих А.В., Сахаров С.С. Неразрушающая диагностика состояния элементов активных зон ядерных реакторов: монография. Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2015. 320 с.
- Павлов С.В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследований облученного топлива ядерных реакторов. Димитровград: ОАО "ГНЦ НИИАР", 2013. 256 с.
- 4. *Xu Yuanhuan, Nie Yong.* Distortion Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique" Post-Irradiation Examination and In-Pile Measurement Techniques for Water Reactor Fuels. Vienna: IAEA, 2009, IAEA-TECDOC-CD-1635.
- 5. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. М.: Энергоиздат, 1981. 207 с.
- 6. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.

- 7. *Павлов С.В.* Изменение изгибной жесткости ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2016. № 3. С. 42–52.
- Павлов С.В. Методы и средства исследований ТВС ВВЭР для экспериментального сопровождения внедрения нового топлива на АЭС: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.03 / Павлов Сергей Владленович. Димитровград, 2015. 339 с.
- Павлов С.В., Шалагинова Т.М., Михайлов С.В., Прокуданов Д.Л. Исследование влияния естественной конвекции на результаты измерения геометрических характеристик твэлов и тепловыделяющих сборок ультразвуковыми методами в условиях бассейнов выдержки: препринт. Димитровград: НИИАР, 1991. 28 с.
- Бражников Н.И. Ультразвуковые методы; под общ. ред. Н.Н. Шумиловского. М.; Л.: Энергия, 1965. 248 с.
- Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
- 12. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1976. 280 с.
- 13. Воронина А.В., Павлов С.В. Методика и программа расчета скорости звука в воде в условиях естественной конвекции у поверхности тепловыделяющих сборок ядерных реакторов // Вестник Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", 2019. Т. 8. № 5. С. 465–472. https://doi.org/10.1134/S2304487X19050080

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 217-225

Mathematical Model of an Acoustic Tract of an Echo-Pulse Method for Measurement of the Geometric Parameters of a Fuel Assembly of a Nuclear Reactor in the Geometric Acoustics Approximation

A. V. Voronina^{*a*,[#]} and S. V. Pavlov^{*a*}

^a Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Dimitrovgrad, 433507 Russia [#]e-mail: AVVoronina@mephi.ru

Received March 27, 2020; revised July 2, 2020; accepted July 7, 2020

Abstract—The principle of determining the sizes during inspection of irradiated fuel assemblies by the ultrasonic echo-pulse method is considered. The factors caused by the presence of residual heat release in the fuel assemblies that affect the propagation path of ultrasound in the medium are presented. In the geometric acoustics approximation, a mathematical model of the acoustic path is developed. The medium in which ultrasound propagates is considered in the approximation of a plane—parallel layered fluid medium with a monotonic variation of the temperature and density of water from layer to layer. It is assumed that the water temperature between the sensors and the surface of the fuel assembly is determined by convective heat transfer between the fuel assembly and the water in the pool of a nuclear power plant. The model takes into account the instability of the speed of sound and the refraction of ultrasonic waves during the oblique incidence of waves on the surface. The proposed model allows the study of the acoustic tract with the ultrasonic echopulse method. This model can be used to develop forming control systems for a VVER-1000 fuel assembly. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА

Keywords: ultrasound method, ultrasound, fuel assemblies, geometric acoustics, refraction

REFERENCES

- 1. Pavlov S.V. Metodologiya materialovedcheskih issledovanij TVS i TVELov VVER dlya operativnogo soprovozhdeniya vnedreniya novogo topliva na AES [Methodology of materials science studies of fuel assemblies and VVER fuel elements for operational support of the introduction of new fuel at nuclear power plants] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. YAdernaya energetika*, 2014, no. 3, pp. 25–34 (in Russian).
- Pavlov S.V., Sukhikh A.V., Sakharov S.S. Nerazrushayushchaya diagnostika sostoyaniya elementov aktivnykh zon yadernykh reaktorov [Non-destructive diagnostics of the state of core elements of nuclear reactors]. Dimitrovgrad: DITI MIFI, 2015. 320 p.
- Pavlov S.V. Nerazrushayuschie ultrazvukovie metodi issledovanii obluchennogo topliva yadernih reaktorov [Non-destructive ultrasonic research methods of irradiated fuel of nuclear reactors]. Dimitrovgrad: JSC "SSC RIAR", 2013. 256 p.
- 4. Xu Yuanhuan, Nie Yong Distortion Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique" Post-Irradiation Examination and In-Pile Measurement Techniques for Water Reactor Fuels. Vienna: IAEA, 2009, IAEA-TECDOC-CD-1635.
- Gorbatov A.A., Rudashevskij G.E. Akusticheskie metody izmereniya rasstoyanij i upravleniya [Acoustic methods for measuring distances and control]. Moscow: Energoizdat, 1981. 207 p.
- Ermolov I.N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* [Theory and practice of ultrasonic testing]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 240 p.
- Pavlov S.V. Izmenenie izgibnoj zhestkosti TVS VVER-1000 pri ekspluatacii [Changes in the bending stiffness of VVER-1000 fuel assemblies during operation]. *Izves*-

tiya vysshih uchebnyh zavedenij. YAdernaya energetika, 2016, no. 3, pp. 42–52 (in Russian).

- 8. Pavlov S.V. *Metody' i sredstva issledovanij TVS VVE'R dlya e'ksperimental'nogo soprovozhdeniya vnedreniya no-vogo topliva na AE'S* [Methods and tools for research of VVER fuel assemblies for experimental support of the introduction of new fuel at nuclear power plants. Dr. eng. sci. diss.]. Dimitrovgrad, 2015. 339 p.
- Pavlov S.V., Shalaginova T.M., Mikhailov S.V., Prokudanov D.L. *Issledovanie vliyaniya estestvennoj konvekcii* na rezul'taty' izmereniya geometricheskix xarakteristik tve'lov i teplovy'delyayushhix sborok ul'trazvukovy'mi metodami v usloviyax bassejnov vy'derzhki [Investigation of the effect of natural convection on the results of measuring the geometric characteristics of fuel rods and fuel assemblies by ultrasonic methods in conditions of cooling pond]. Dimitrovgrad: RIAR, 1991. 28 p.
- Brazhnikov, N.I. *Ul'trazvukovy'e metody*' [Ultrasonic methods]. In Shumilovskogo N.N. (ed.), Moscow, Leningrad: Energiya, 1965. 248 p.
- Vybornov B.I. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya* [Ultrasonic flaw detection]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 256 p.
- 12. Sverdlin G.M. *Prikladnaya gidroakustika* [Applied hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1976. 280 p.
- Voronina A.V., Pavlov S.V. Metodika i programma rascheta skorosti zvuka v vode v usloviyah estestvennoj konvekcii u poverhnosti teplovydelyayushchih sborok yadernyh reaktorov [Method and Program to Calculate the Speed of Sound in Water under the Conditions of Natural Convection along the Surface of Fuel Assemblies of Nuclear Reactors]. *Vestnik Nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"*, 2019. vol. 8. no 5. pp. 465–472.

https://doi.org/10.1134/S2304487X19050080 (in Russian).

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, с. 226–235

АВТОМАТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382+621.396.6

КОРРЕКЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ПОМЕХ В КМОП КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ СБОРЕ ЗАРЯДА С ТРЕКОВ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ

© 2020 г. В. Я. Стенин^{1,2,*}, Ю. В. Катунин^{2,**}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия ² НИИ системных исследований Российской академии наук, Москва, 117218, Россия

> *e-mail: vystenin@mephi.ru **e-mail: katunin@cs.niisi.ras.ru Поступила в редакцию 28.02.2020 г. После доработки 28.02.2020 г. Принята к публикации 28.04.2020 г.

В работе приводятся результаты моделирования средствами 3D-TCAD импульсных помех, возникающих на выходах комбинационных КМОП элементов в составе мажоритарного элемента при сборе заряда с треков одиночных ионизирующих частиц. Даны оценки длительности импульсов помех и их уменьшения в логических элементах по КМОП 65-нм объемной технологии с неглубокой траншейной изоляцией (shallow trench isolation) групп транзисторов. Моделирование проведено при линейной передаче энергии частицей на трек 60 МэВ см²/мг. Когда заряд с трека частицы собирают запертые транзисторы элементов И-НЕ (ИЛИ-НЕ), то они переходят в открытое состояние (в частности, в инверсное смещение). Это образует импульс помехи на узле И-НЕ (ИЛИ-НЕ), который запирает транзистор выходного инвертора элемента И (ИЛИ). Запертый транзистор инвертора, собирая заряд с того же трека, может компенсировать часть длительности импульса при передаче его на выход элемента И (ИЛИ). Дублирование инвертора расположением основных и дополнительных транзисторов инвертора на граничных сторонах топологических групп транзисторов И-НЕ (ИЛИ-НЕ) способствует снижению длительности помех при сборе заряда с трека одиночной частицы. С учётом коррекции, длительности импульсов помех, возникающих в мажоритарном элементе, находятся в диапазоне 50–300 пс.

Ключевые слова: импульс помехи, комбинационный элемент, мажоритарный элемент, моделирование, одиночная ионизирующая частица, передача энергии, трек частицы **DOI:** 10.1134/S2304487X20020145

1. ВВЕДЕНИЕ

КМОП комбинационные логические элементы являются основой кодирующих, декодирующих устройств и мажоритарной логики. Результатом воздействия одиночных ионизирующих частиц на логические элементы является импульсная помеха на выходе элемента [1], вызванная временным изменением логического состояния (single event transient – SET) элемента. Моделирование эффектов воздействия одиночных ионизирующих частиц с применением приборных физических моделей (physics-based device models) как двумерных (2D), так и трехмерных (3D) посвящен ряд работ [2-4], в которых был, например, установлен моделированием [2] эффект перехода NMOП транзисторов КМОП инвертора с проектной нормой 0.18 мкм по объемной технологии в инверсный режим смещения при LET > 3 МэВ см²/мг с увеличением длительности импульса помехи до

300-500 пс при LET = 30 МэВ см²/мг; предсказано [3] существенное снижение помехоустойчивости КМОП логики по объемной технологии до уровня линейной передачи энергии частицы на трек (linear energy transfer – LET) 2 МэВ см²/мг при снижении проектной нормы до 100 нм КМОП. Систематизированы физические, схемные, технологические и конструктивные результаты исследований [4] которые направлены на vчет и подавление импульсов помех, приводящих к ложным сигналам в цепях микросхем. При проектных нормах менее 100 нм КМОП заметно проявилось влияние диффузионного переноса носителей заряда, индуцированных на треке, на транзисторы смежных элементов [5]. При этом общий сбор заряда может снизить длительности импульсных помех (effect of quenching), что было показано в работах [6, 7]. Этот эффект использован при разработке топологии КМОП элементов де-



Рис. 1. Схема мажоритарного элемента на логических И (D1–D3) и ИЛИ (D4) элементах.

кодеров буфера ассоциативной трансляции [8] микропроцессора с повышенной помехоустойчивостью к воздействиям одиночных частиц.

Показано [9], что КМОП тройной мажоритарный элемент (Triple Majority Gate – TMG) на основе элементов И-НЕ при топологии с чередованием транзисторов последовательно соединенных элементов И-НЕ имеет улучшенную помехоустойчивость по сравнению со стандартным вариантом топологии. Установлены [10] основные характеристики тройного мажоритарного элемента (TMG) на основе элементов И и ИЛИ с проектной нормой объемный 65-нм КМОП, и подтверждена возможность коррекции импульсов помех совместным расположением транзисторов элементов И (ИЛИ) в группы, изолированные от других групп мелкой траншейной оксидной изоляцией (shallow trench isolation – STI).

Целью данной работы является моделирование средствами TCAD базовых элементов с логикой И и ИЛИ в составе мажоритарного элемента по проектной норме объемный 65-нм КМОП с мелкой траншейной изоляцией транзисторов для получения количественных оценок длительностей импульсов помех и реальных процессов по их коррекции при сборе заряда с трека одиночной частицы как основы рекомендаций для проектирования комбинационной логики с наноразмерными проектными нормами для быстродействующих высокопроизводительных систем с цепями кодирования-декодирования и резервирования потоков данных.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КМОП МАЖОРИТАРНОГО ЭЛЕМЕНТА

2.1. Схема и конструкция мажоритарного элемента на элементах И и ИЛИ

На рис. 1 приведена функциональная схема мажоритарного элемента ТМС из трех двухвходовых КМОП элементов D1, D3, D4 с логикой И и двух D2, D5 двухвходовых КМОП элементов ИЛИ. Элементы D1, D2 на рис. 1 представлены электрическими схемами. Первая цифра в обозначениях транзисторов, например, N1.2 соответствует номеру логического элемента D1 (И) и D2 (ИЛИ) на рис. 1, а вторая – номеру транзистора в элементах И и ИЛИ.

Элемент И (D1 на рис. 1) состоит из логического элемента И-НЕ на транзисторах N1.1, N1.2, P1.1, P1.2 и инвертора на транзисторах N1.3, N1.4 и Р1.3, Р1.4. Внутренний узел И-НЕ является выходом элемента И-НЕ и входом инвертора. Элемент ИЛИ (D2 на рис. 1) состоит из элемента ИЛИ-НЕ на транзисторах N2.1, N2.2, P2.1, P2.2 и инвертора на транзисторах N2.3, N2.4, P2.3, P2.4. Выход элемента ИЛИ-НЕ является внутренним узлом элемента ИЛИ и входом инвертора. Элемент И состоит из двух групп транзисторов, одна группа Gr1N из NMOП транзисторов, а вторая Gr1P из РМОП транзисторов (рис. 1). Аналогично элемент ИЛИ состоит из двух групп транзисторов: группа Gr2N из NMOП транзисторов и группа Gr2P из РМОП транзисторов.

На рис. 2 приведены эскизы топологии КМОП комбинационных элементов с логикой И (рис. 2а) и с логикой ИЛИ (рис. 2б). Области кремния, в ко-



Рис. 2. Эскизы топологии комбинационных элементов: (а) с логикой И; (б) с логикой ИЛИ; области кремния, в которых выполнены МОП транзисторы, ограничены прямоугольниками, которые окружены мелкой траншейной изоляцией диэлектриком (диоксидом кремния) глубиной 400 нм; полоски с штриховкой обозначают затворы транзисторов, звездочками отмечены точки входа треков одиночных частиц.

торых выполнены МОП транзисторы, ограничены прямоугольниками, которые окружены мелкой траншейной изоляцией диэлектриком (диоксидом кремния) глубиной 400 нм. Полоски со штриховкой обозначают затворы транзисторов, звездочками отмечены точки входа треков одиночных частиц. Транзисторы инвертора элементов И и ИЛИ продублированы так, что NMOП транзисторы N1.3 и N1.4 в элементе И (рис. 2a), а также транзисторы N2.3 и N2.4 в элементе ИЛИ (рис. 2б), конструктивно расположены симметрично с разных сторон от NMOП транзисторов элемента И-НЕ в группе Gr1N и в группе Gr2N элемента ИЛИ-НЕ. Аналогично расположены пары РМОП транзисторов Р1.3 и Р1.4 и Р2.3 и Р2.4 с разных сторон от РМОП транзисторов элемента И-НЕ в группе Gr1P (рис. 2a) и элемента ИЛИ-НЕ в группе Gr2P (рис. 26). Это сделано с целью повышения эффективности коррекции импульсов помех, возникающих при сборе заряда с трека при разном удалении точек входа треков от транзисторов инвертора.

2.2. Особенности моделирования сбора заряда с трека частицы

В работе проведено гибридное TCAD-SPICE моделирование КМОП мажоритарного элемента (рис. 1), при котором средствами TCAD моделировались процессы генерации носителей заряда при передаче им энергии с трека в кремнии и процессы сбора заряда транзисторами в элементах D1 (И) и D2 (ИЛИ). Средствами SPICE моделировались характеристики двух элементов И (D3, D4) и элемента ИЛИ D3, которые обеспечивали передачу сигналов на вход элемента ИЛИ D2.

Моделирование сбора транзисторами заряда с треков олиночных частии проведено с использованием 3D TCAD физических моделей КМОП транзисторов [11] по проектной норме 65-нм КМОП объемной технологии. Как тестовое воздействие принят сбор заряда с трека, направленного по нормали к поверхности приборной части молели элемента. Звезлочками на рис. 2 отмечены точки входа треков частиц в стоковые и истоковые области транзисторов. Ширина каналов всех транзисторов элементов И и ИЛИ равна 400 нм. Конструкции элементов И и ИЛИ состоят из транзисторов, выполненных в кремниевых областях, окруженных мелкой траншейной изоляцией с глубиной 400 нм (shallow trench isolation -STI). Области NMOП и РМОП транзисторов разделены охранными полосами, изолирующими эти области и служащие для вывода неравновесных зарядов на шину питания и общую шину.

Полные размеры 3D приборной структуры составляют 6.4 мкм × 10.9 мкм при толщине подложки 3.0 мкм. Энергетическая составляющая генерации заряда на треке характеризуется линейной передачей энергии частицей на трек [1] – (linear energy transfer – LET). При моделировании использовались треки с LET = 60 МэВ см²/мг. Результаты 3D TCAD моделирования получены с использованием симулятора Sentaurus Device при температуре 25°С и напряжении питания 1.0 В.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Алгоритм работы тройного мажоритарного элемента на рис. 1 заключается в сравнении трех входных сигналов и образовании выходного сиг-



Рис. 3. Зависимости напряжений на узлах элемента И при сборе заряда с треков с точками входа в группу Gr1P, линейная передача энергии на трек LET = 60 MэB см²/мг, образование трека при t_{TP} = 100 nc, на TMG входах A = B = 1, C = 0: (а) точки входа трека 2p, 6p в транзисторы инвертора; (б) точки входа трека 3p, 4p и 5p в транзисторы группы И-HE.

нала, который соответствует совпадению как минимум двух входных сигналов из трех. Тогда эти два сигнала управляют правильным переключением только одного из трех элементов И. Соответственно для получения достоверных данных о влиянии сбора заряда с трека частицы на образование импульсов помех на выходах элементов И, ИЛИ и элемента ТМС достаточно моделирования средствами TCAD одного из элементов И, а именно D1, и элемента ИЛИ D2 (рис. 1) с двумя вариантами входных сигналов: A = B = C = 0 и A = B = 1, C = 0. При входных сигналах на TMG A = B = C = 0 на входах элемента И будет $V_{BX1} =$ $= V_{BX2} = 0$; на входах элемента ИЛИ $V_{BX1} = V_{BX2} =$ $= V_{BX3} = 0$, а на выходе TMG $V_{Bbix,TMG} = 0$. При сигналах A = B = 1, C = 0 на входах элемента И $V_{BX1} = V_{BX2} = 1$ В, на входах элемента ИЛИ $V_{BX1} = 1$ В, $V_{BX2} = V_{BX3} = 0$, а на выходе ИЛИ и ТМС элемента $V_{BbIX,TMG} = 1 B.$

3.1. Треки через РМОП транзисторы И-НЕ группы Gr1P элемента И D1

На рис. 3 приведены зависимости напряжений на узлах элемента И для точек входа трека в РМОП транзисторы группы Gr1P при сигналах на входах TMG элемента A = B = 1; C = 0, линейная передача энергии на трек LET = 60 MэB см²/мг, начало сбора заряда при $t_{TP} = 100$ пс.

Зависимости напряжений на рис. 3 соответствуют точкам входа трека от 2р до 6р в группе РМОП транзисторов Gr1P элемента И (рис. 2а). Точки 2р и 6р — это точки входа трека в стоки транзисторов P1.3, P1.4 инвертора, а точки 3р, 4р и 5р — это точки входа трека в истоки и стоки транзисторов P1.1, P1.2 группы И-НЕ. Транзисторы P1.3, P1.2, P1.1 (рис. 2а) выполнены в кармане N-типа проводимости в общей области кремния размером 885 нм × 400 нм, окруженного мелкой траншейной изоляцией глубиной 400 нм. Один из транзисторов P1.4 выполнен в отдельной области кремния размером 360 нм × 400 нм, отделенной от основной группы РМОП транзисторов слоем траншейной изоляции толщиной 120 нм. Области кремния с транзисторами, окруженные траншейной изоляцией, на рис. 2 ограничены прямо-угольниками.

Треки с точками входа 2p—5p проходят через общую область кремния транзисторов P1.3, P1.2, P1.1, генерируя в ней электронно-дырочные пары. Эффективность сбора заряда транзисторами в этой группе зависит от расстояния до точки входа трека от стоковой области транзистора и диффузии к ней носителей заряда от трека. Детали сбора заряда несколько меняются в зависимости от точки входа трека, но общий характер зависимостей напряжений сохраняется как для узла И-НЕ, так и на выходе И (рис. За и 36).

Главное в зависимостях напряжений на узле И-НЕ и выходе И при образовании импульсов помех обусловлено взаимодействием двух внутренних элементов: группы транзисторов И-НЕ и группы транзисторов инвертора. При сигналах на входах ТМG элемента A = B = 1, C = 0 транзисторы P1.2, P1.2 группы И-НЕ заперты и при сборе заряда с трека напряжение на их общих стоках повышается, что формирует импульс помехи на узле И-НЕ и соответственно на входе инвертора. Транзисторы P1.3 и P1.4 инвертора запираются и начинается сбор заряда с трека преимущественно

229



Рис. 4. Зависимости напряжений на узлах элемента ИЛИ при сборе заряда с треков с точками входа в группу Gr2N, линейная передача энергии на трек LET = $60 \text{ МэВ см}^2/\text{мr}$, образование трека при $t_{\text{TP}} = 100 \text{ nc}$, на TMG входах A = B = C = 0: (а) точки входа трека 2n, 6n в транзисторы инвертора; (б) точки входа трека 3n, 4n и 5n в транзисторы группы ИЛИ-HE.

тем транзистором инвертора, который ближе к треку. Сбор этого заряда (дырок) компенсирует начальную часть импульса помехи отрицательной полярности на выходе И, который образуется инвертированием помехи с узла И-НЕ (рис. 3).

Этот процесс одинаков для всех рассмотренных точек входа трека 2p-5p, но для трека с точкой входа 6p в сток транзистора P1.4 в объеме кремния, отделенного слоем диэлектрика от основной части транзисторов группы Gr1P (рис. 2a), импульс на выходе И отсутствует так, как транзистор P1.4 до момента времени t =220 пс находится в инверсном смещении (рис. 3a).

Когда трек с точкой входа 3р проходит через общую область истоков транзистора Р1.2 и Р1.3 (рис. 2а), заряд (дырки) с этого трека поступает сразу в область стока транзистора Р1.3 инвертора, заряжая емкость выходного узла элемента И до напряжения 0.9 В (зависимость Выход И с маркером 3р на рис. 36). Затем узел выхода И начинает разряжаться через открытые NMOП транзисторы N1.3, N1.4 инвертора, незначительно заряжаясь сбором дырок с трека 3р через обратно смещенный стоковый рп переход транзистора Р1.3. В момент времени t =300 пс (рис. 3б) напряжение на выходе И снижается до 0.17 В, что соответствует экстремуму импульса помехи с маркером 3р. К этому времени завершается сбор заряда транзисторами Р1.1, Р1.2, и узел И-НЕ начинает разряжаться до напряжения общей шины 0 В, а инвертор отслеживает это снижение, повышая напряжение на выходе И до 1 В.

Точки входа треков 4р и 5р отстоят на 0.25 мкм и 0.5 мкм от точки входа 3р (рис. 2а), заряд с трека от этих треков диффундирует с задержкой к транзисторам P1.3, P1.4 инвертора, и инвертор в начале сбора заряда с трека 4р или 5р успевает переключиться. При переключении напряжение на выходе И снижается до 0.08 В, что образует фронт импульса помехи отрицательной полярности на выходе И (рис. 36). Затем через 10–20 пс запертые транзисторы P1.3, P1.4 инвертора начинают собирать заряд (дырки) с трека, что образует встроенный импульс положительной полярности на выходе И после фронта импульса помехи отрицательной полярности на выходе И (рис. 36). Этот эффект несколько снижает длительность импульса помехи отрицательной полярности, если отсчитывать длительность на уровне 0.1–0.15 В.

3.2. Треки через NMOП транзисторы ИЛИ-НЕ группы Gr2N элемента ИЛИ D2

На рис. 4 приведены зависимости напряжений на узлах элемента ИЛИ для точек входа трека в NMOП транзисторы группы Gr2N при сигналах на входах TMG элемента A = B = C = 0, линейная передача энергии на трек LET = 60 MэB см²/мг, начало сбора заряда при $t_{TP} = 100$ пс.

Зависимости на рис. 4 даны для точек входа трека от 2n-6n в группе NMOП транзисторов (рис. 26). Точки 2n и 6n для треков в стоки транзисторов N2.3, N2.4 инвертора, а точки 3n, 4n и 5n – в истоки и стоки транзисторов N2.1, N2.2 группы ИЛИ-НЕ. Транзисторы N2.1 – N2.3 (рис. 26) выполнены в кремниевой подложке P-типа проводимости в области, окруженной мелкой траншейной изоляцией глубиной 400 нм, а транзисторов инвертора N2.4 – в небольшой области, отделенной от основной группы транзисторов слоем изоляции толщиной 120 нм.

Треки 2n—5n генерируют заряд в общую область кремния транзисторов N2.1—N2.3, эффективность сбора которого зависит от расстояния стоковой области транзистора до трека. Поэтому характер зависимостей на рис. 4а и 46 сохраняется для узла ИЛИ-НЕ и выхода ИЛИ.

Особенности образования импульсов помех обусловлены взаимодействием групп транзисторов ИЛИ-НЕ и инвертора. При сигналах на входах элемента A = B = C = 0 транзисторы N2.1, N2.2 группы ИЛИ-НЕ заперты, в начале сбора заряда напряжение на их общих стоках снижается. формируя импульс помехи на узле ИЛИ-НЕ и соответственно на входе инвертора. Транзисторы N2.3, N2.4 инвертора запираются, начинается сбор заряда с трека в основном тем транзистором инвертора, который ближе к треку. Этот заряд электронов на емкости выходного узла ИЛИ компенсирует часть импульса помехи положительной полярности, который образуется инвертированием импульса, образованного на узле ИЛИ-НЕ (рис. 4). Этот процесс практически одинаков для точек входа трека 2n-5n, но при точке входа 6р в сток транзистора N2.4 влияние сбора заряда в отделенном объеме кремния незначительно и импульс на выходе ИЛИ имеет малую амплитуду (рис. 4а).

К особенностям характеристик переходного процесса при образовании импульсов помех при сборе заряда с треков с разными точками входа можно отнести переход транзисторов N2.3, N2.4 инвертора в инверсное смещение в начале сбора заряда при точках входа 2n, 6n до напряжения – 0.4 В (рис. 4a), а также транзисторов N2.1, N2.2 группы ИЛИ-НЕ при точках входа треков 3n-5n (рис. 4б). Кроме того, в случае, когда трек с точкой входа 3n проходит через общую область истоков транзистора N2.2 группы ИЛИ-НЕ и транзистора N2.3 инвертора (рис. 2б), заряд электронов с трека сразу удерживает емкость выходного узла ИЛИ при напряжении 0 В, что исключает переключение инвертора (выход ИЛИ с маркером 3n на рис. 4б). Затем узел выхода ИЛИ начинает заряжаться через РМОП транзисторы Р2.3, Р2.4 инвертора, но одновременно и разряжаться сбором электронов с трека 3п через обратно смещенный стоковый *рп* переход транзистора N2.3 инвертора. Баланс процесса заряда-разряда выходного узла удерживает напряжение на выходе ИЛИ около 0 В до 280 пс (рис. 4б), затем напряжение возрастает до 0.85 В при t = 435 пс, что соответствует экстремуму импульса помехи с маркером 3n.

Точки входа треков 4n и 5n отстоят на 0.25 мкм и 0.5 мкм от точки входа 3n (рис. 26), поэтому заряд от этих треков диффундирует с задержкой к транзисторам N2.3, N2.4 инвертора, поэтому в отличие от сбора заряда с трека точкой входа 3n инвертор успевает переключить выход ИЛИ до уровня 0.7-0.9 В через 15-30 пс после возникновения трека. Далее до момента времени t = 435 пс напряжение на выходе ИЛИ изменяется практически, как и для трека с точкой входа маркером 3n на рис. 46. При t = 435 пс завершается сбор заряда транзисторами N2.1, N2.2 и узел ИЛИ-НЕ начинает заряжаться до напряжения питания 1 В через транзисторы P2.1, P2.2, а инвертор отслеживает это изменение, снижая напряжение на выходе ИЛИ до 0 В.

В итоге взаимодействие изменения на узле ИЛИ-НЕ при сборе заряда с трека и сбора заряда запертым транзистором инвертора образует встроенный импульс отрицательной полярности, который компенсирует часть импульса помехи положительной полярности на выходе ИЛИ. Этот эффект существенно снижает длительность импульса помехи на выходе элемента ИЛИ.

3.3. Коррекция длительности импульсов помех на выходах элементов И и ИЛИ в зависимости от линейного переноса энергии на трек

На рис. 5а приведены зависимости длительности импульсов помехи на узле И-НЕ и выходе элемента И при точках входа трека 4р в область РМОП транзисторов элемента И-НЕ группы хгGr1P при входных сигналах TMG элемента A == C = 1, B = 0.

На рис. 56 приведены зависимости длительности импульсов помехи на узле ИЛИ-НЕ и выходе элемента ИЛИ при точках входа трека 4n в область NMOП транзисторов элемента ИЛИ-НЕ группы Gr2N при входных сигналах TMG элемента A = C = B = 0.

Длительности импульсов помех отрицательной полярности на выходе И (рис. 5а) определенны на уровне $\Delta V = 0.3$ В относительно напряжения общей шины, что соответствует уровню 0.7 В относительно пьедестала импульса помехи. Даны и зависимости, которые определены на уровне $\Delta V = 0.2$ В. Длительности импульсов помех положительной полярности на выходе ИЛИ (рис. 5б) определенны на уровне $\Delta V = 0.7$ В относительно общей шины.

При увеличении переноса энергии на трек как с точкой входа 4р в группу РМОП транзисторов И-НЕ, так и на трек с точкой входа 4n в группу NМОП транзисторов ИЛИ-НЕ, генерируется больше заряда и увеличивается сбор его. При этом возрастает длительность импульса на узле И-НЕ (рис. 5а) и на узле ИЛИ-НЕ (рис. 5б), но одновременно больше заряда диффундирует до запертых транзисторов инвертора, сбор которого компенсирует часть увеличения длительности

Рис. 5. Длительности импульсов помехи на узлах элементов И и ИЛИ в зависимости от линейной передачи энергии на трек в диапазоне от 10 до 90 МэВ см²/мг: (а) для точки входа трека 4р в группу РМОП транзисторов Gr1P при входах ТМG элемента A = B = 0, C = 0; (б) для точки входа трека 4n в группу NMOП транзисторов Gr2N при входах TMG элемента A = B = C = 0.

импульса помехи на выходе элемента И (рис. 5а), а также выходе элемента ИЛИ (рис. 5б).

В итоге при LET \geq 60 МэВ см²/мг длительность импульса помехи на выходе И снижается с 295 пс до 250 пс при оценке по уроню 0.3 В. Оценка по уроню 0.2 В при LET \geq 30 МэВ см²/мг дает снижение длительности помехи с значения 190 пс до значения 130 пс (рис. 5а).

В итоге длительность импульса помехи на выходе ИЛИ снижается с 190 пс при LET = $20 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$ до 83 пс при LET = $90 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$, соответственно снижение длительности импульса помехи на выходе ИЛИ по отношению к длительности импульса помехи на узле ИЛИ-НЕ при 20 МэВ см²/мг составляет 1.5 раза, при 60 МэВ см²/мг составляет 4.3 раза, а при = $90 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$ 7.8 раза (рис. 56).

В таблице 1 приведены значения длительностей импульсов помех (ложных сигналов) на выходах элементов И и ИЛИ тройного мажоритарного элемента ТМG со схемой на рис. 1. Импульсы помех вызваны сбором заряда с треков одиночных частиц при линейной передаче энергии на трек 60 МэВ см²/мг с точками входа треков в группы транзисторов Gr1N, Gr1P элемента И D1, а также группах Gr2N, Gr2P элемента ИЛИ D2 (точки входа треков частиц на рис. 2а и рис. 2б). В таблице отмечены жирным шрифтом и длительности импульсов помех в группе Gr1P элемента И D1 при входах A = B = 1; C = 0, а также в группе A = B = C = 0. Образование импульсов помех в элементах И

Gr2N элемента ИЛИ D2 при сигналах на входах

Образование импульсов помех в элементах и (ИЛИ) зависит от исходного смещения транзисторов в элементах мажоритарного элемента:

1) если в группе И-НЕ (ИЛИ-НЕ) транзисторы заперты, а в инверторе открыты, то собирая заряд с трека, транзисторы в группе И-НЕ (ИЛИ-НЕ) переходят в инверсное смещение или близкое к нему, а транзисторы инвертора запираются и, собирая заряд, укорачивают импульс помехи, передаваемый с узла И-НЕ (ИЛИ-НЕ) на выход И (ИЛИ);

2) если в группе И-НЕ (ИЛИ-НЕ) транзисторы открыты и остаются в открытом состоянии при сборе заряда с трека, то запертые транзисторы инвертора, собирая заряд, образуют импульс помехи, который не подвергается коррекции по длительности.

Если заряд, образованный на треке, недостаточен для образования транзисторами инвертора импульса, корректирующего импульс помехи на выходе элемента И (ИЛИ), то инвертор передает с инверсией на выход И (ИЛИ) изменение напряжения на узле И-НЕ (ИЛИ-НЕ). Запертые транзисторы группы И-НЕ (ИЛИ-НЕ), собирая заряд с трека, могут до возникновения переключающих сигналов на входах элемента переключить сразу элемент с опережением.


Таблица 1. Значения длительностей импульсов помех, образующихся на выходах элементов И в группах транзисторов Gr1N, Gr1P и ИЛИ в группах транзисторов Gr2N, Gr2P тройного мажоритарного элемента для точек входа трека с LET = 60 МэB см²/мг

Номер точки входа трека	1n/1p	2n/2p	3n/3p	4n/4p	5n/5p	6n/6p	7n/7p	8n/8p
Группа Gr1N, И A = B = C = 0	0	0	0	0	45 пс	0	0	0
Группа Gr1N, И A = B = 1; C = 0	0	214 пс	209 пс	154 пс	47 пс	243 пс	244 пс	0
Группа Gr1P, И А = B = C = 0	0	76 пс	44 пс	0	0	86 пс	7 пс	0
Группа Gr1P, И A = B = 1; C = 0	0	135 пс	192 пс	290 пс	280 пс	0	0	0
Группа Gr2N, ИЛИ A = B = C = 0	0	70 пс	100 пс	110 пс	95 пс	0	0	0
Группа Gr2N, ИЛИ A = B = 1; C = 0	0	220 пс	250 пс	195 пс	165 пс	250 пс	255 пс	0
Группа Gr2P, ИЛИ A = B = C = 0	0	77 пс	54 пс	0	0	82 пс	75 пс	0
Группа Gr2P, ИЛИ A = B = 1; C = 0	0	0	0	11 пс	60 пс	0	0	0

Примечание: длительности импульсов помех определены по уровню 0.7 В относительно пьедестала импульса.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надежность высокопроизводительных микропроцессорных систем с цепями кодирования-декодирования и резервирования данных зависит от помехоустойчивости элементов многоканальных цепей к воздействию одиночных ионизирующих частиц. Импульсные помехи в мажоритарных элементах являются ложными выходными сигналами, что ограничивает и быстродействие микропроцессорных систем.

Результаты моделирования процесса коррекции длительности помех в 65-нм КМОП элементах И и ИЛИ по объемной технологии показали. что расположение в общем объеме кремния, окруженном траншейной изоляцией, каскадно включенных транзисторов способствует коррекции (снижению) длительности импульсов помех, образующихся в узлах И-НЕ до 1.5 раза, а в ИЛИ-НЕ в 1.5-7 раз. Активную коррекцию помех сбором заряда с трека частицы осуществляют NMOП транзисторы инверторов на выходах элементов ИЛИ. Инверторы в зависимости от исходного режима смещения мажоритарного элемента либо корректируют длительности помех, либо создают их сами при сборе заряда с трека, но с длительностью не более 90-250 пс. Длительности импульсов помех в двухвходовых КМОП элементах И и ИЛИ мажоритарного элемента с учётом эффекта коррекции находятся в диапазоне 50-300 пс.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00651.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Soft errors in modern electronic systems / Editor M. Nicolaidis. New York: Springer, 2011. P. 35–37.
- Dodd P.E., Messengill L.W. Basic Mechanisms and Modeling of Single-Event Upset in Digital Microelectronics // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. V. 50. № 3. P. 583–602.
- 3. Dodd P.E., Shaneyfelt M.R., Felix J.A., Shwank J.R. Production and Propagation of Single-Event Transients in High-Speed Digital Logic ICs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. V. 51. № 6. P. 3278– 3284.
- 4. *Ferlet-Cavrois V., Messengill L.W., Couker P.* Single-Event Transients in Digital CMOS – A Review // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. V. 60. № 3. P. 1767–1790.
- 5. Mahatme N.N., Jagannathan S., Loveless T.D., Massengill L.W., Bhuva B.L., Wen S.-J., Wong R. Comparison of combinational and sequential error rates for a deep submicron process // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2011. V. 58. № 6. P. 2719–2725.
- 6. Ahlbin J.R., Massengill L.W., Bhuva B.L., Narasimham B., Gadlage M.J., Eaton P.H. Single-event transient pulse quenching in advanced CMOS logic circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. V. 56. № 6. P. 3050–3056.
- Atkinson N.M., Witulski A.F., Holman W.T., Ahlbin J.R., Bhuva B.L., Massengill L.W. Layout technique for single-event transient mitigation via pulse quenching //

IEEE Transactions on Nuclear Science. 2011. V. 58. № 3. P. 885–890.

- Stenin V.Ya., Antonyuk A.V., Katunin Yu.V., Stepanov P.V. Translation Lookaside Buffer on the 65-nm STG DICE Hardened Elements // Telfor Journal. 2018. V. 10. № 1. P. 50-55.
- Катунин Ю.В., Стенин В.Я. Компенсация импульсов помех в троичном КМОП мажоритарном элементе на логических элементах И-НЕ при воздей-

ствии одиночных ионизирующих частиц // Вестник НИЯУ МИФИ. 2019. Т. 8. № 4. С. 357–364.

- Катунин Ю.В., Стенин В.Я. Моделирование воздействия одиночных ионизирующих частиц на логические элементы КМОП тройного мажоритарного элемента // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 2. С. 71-80.
- Garg R., Khatri S.P. Analysis and design of resilient VLSI circuits: mitigating soft errors and process variations. New York: Springer, 2010. P. 194–205.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 2, pp. 226-235

Correction of the Duration of Error Pulses in CMOS Combinational Logic Elements when Collecting Charge from Tracks of Single Particles

V. Ya. Stenin^{*a,b,#*} and Yu. V. Katunin^{*b,##*}

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia
 ^b Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218 Russia
 [#]e-mail: vystenin@mephi.ru

##e-mail: katunin@cs.niisi.ras.ru

Received February 28, 2020; revised February 28, 2020; accepted April 28, 2020

Abstract—The 3D-TCAD simulation of a noise pulse generation in CMOS combinational elements as a part of a majority element when collecting charge from tracks of single ionizing particles has been reported. The duration of noise pulses and its reducing in the logical elements by the 65-nm CMOS bulk technology with shallow trench isolation of transistor groups have been estimated. The simulation of the charge collection has been performed for a linear energy transfer of 60 MeV cm²/mg to a track. When the charge is collected from the particle track by the closed transistors of the NAND (NOR) elements, they transit to an open state (in particular, to the inverse offset mode). As a result, a noise pulse appears at the NAND (NOR) node, which closes the transistor of the output inverter of the AND (OR) element. The closed transistor of the inverter, collecting a charge from the same track, can compensate a part of the pulse duration when transmitting the pulse to the output of the AND (OR) element. Duplicating the inverter with the location of the main and additional transistors of the inverter on the boundary sides of the topological groups of NAND (NOR) transistors promotes reducing the duration of noise pulses when collecting a charge from the track of a single particle. Taking into account the correction, the duration of interferences occurring in the majority element is in the range of 50-300 ps.

Keywords: noise pulse, combinational element, majority element, simulation, single ionizing particle, energy transfer, particle track

DOI: 10.1134/S2304487X20020145

REFERENCES

- 1. Soft errors in Modern Electronic Systems / M. Nicolaidis, Ed. New York: Springer, 2011. pp. 35–37.
- Dodd P.E., Messengill L.W., Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, vol. 50, no. 3, pp. 583–602.
- Dodd P.E., Shaneyfelt M.R., Felix J.A., Shwank J.R., production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, vol. 51, no. 6, pp. 3278–3284.
- Ferlet-Cavrois V., Messengill L.W., Couker P., Singleevent transients in digital CMOS – A review, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, vol. 60, no. 3, pp. 1767–1790.
- Mahatme N.N., Jagannathan S., Loveless T.D., Massengill L.W., Bhuva B.L., Wen S.-J., Wong R., Comparison of combinational and sequential error rates for a deep submicron process, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, vol. 58, no. 6. pp. 2719–2725.
- 6. Ahlbin J.R., Massengill L.W., Bhuva B.L., Narasimham B., Gadlage M.J., Eaton P.H., Single-event transient pulse quenching in advanced CMOS logic cir-

234

cuits, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, vol. 56, no. 6. pp. 3050–3056.

- Atkinson N.M., Witulski A.F., Holman W.T., Ahlbin J.R., Bhuva B.L., Massengill L.W., Layout technique for single-event transient mitigation via pulse quenching, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, vol. 58, no. 3. pp. 885–890.
- Stenin V.Ya., Antonyuk A.V., Katunin Yu.V., Stepanov P.V., Translation Lookaside Buffer on the 65-nm STG DICE hardened elements, *Telfor Journal*, 2018., vol. 10, no. 1, pp. 50–55.
- 9. Katunin Yu.V., Stenin V.Ya., Kompensaciya impul'sov pomekh v troichnom KMOP mazhoritarnom elemente

na logicheskih elementah I-NE pri vozdejstvii odinochnyh ioniziruyushchih chastic [The noise pulse compensation in the ternary CMOS majority element on logical elements NAND under impacts of single ionizing particles], *Vestnik NIYaU MIFI*, 2019, vol. 8, no. 4, pp. 357–364 (in Russian).

- Katunin Yu.V., Stenin V.Ya., Modeling of single ionizing particles impacts on CMOS logic elements of a triple majority gate, *Russian Microelectronics*, 2020, vol. 49, no. 3, pp. 214–223.
- 11. Garg R., Khatri S.P. Analysis and design of resilient VLSI circuits: Mitigating soft errors and process variations. New York: Springer, 2010. pp. 194–205.

_ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА _____ И ИНФОРМАТИКА _____

УДК 004.91

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИЗАДАЧНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ГЕНЕРАЦИИ ЗАГОЛОВКА, ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕММ И КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ

© 2020 г. И. А. Молошников^{1,*}, А. В. Грязнов^{1,**}, Д. С. Власов^{1,***}, Р. Б. Рыбка^{1,****}, А. Г. Сбоев^{1,2,*****}

¹ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, 123182, Россия ² Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия

*e-mail: ivan-rus@yandex.ru **e-mail: artem.official@mail.ru ***e-mail: vfked0d@gmail.com ****e-mail: rybkarb@gmail.com ****e-mail: sag111@mail.ru Поступила в редакцию 23.06.2020 г. После доработки 23.06.2020 г. Принята к публикации 07.07.2020 г.

В работе проведено комплексное исследование эффективности мультизадачных методов глубокого обучения комбинированных нейросетевых моделей на выбранном наборе задач: генерации заголовков, определения лемм и ключевых слов. Мультизадачная модель строилась на основе слоев Multi-head Attention, на основе нее разрабатывалась генеративная модель для формирования заголовков и модель на основе слоев LSTM для лемматизации. В работе использовались открытые корпуса: РИА Новости, содержащий тексты новостей и заголовки к ним и корпус с морфологической, синтаксической разметкой и леммами СинТагРус из проекта universaldependencies. Для задачи выделения ключевых слов авторами был собран новый корпус на базе новостных текстов с использованием краудсорс платформы. По результатам работы показано повышение точности на 1% в F1 мере для задачи лемматизации при использовании признаков из мультизадачной модели по сравнению с использованием только признаков морфологии, достигнуты state-of-art точности для задачи генерации заголовка (0.42 ROUGE F1 мере). На основе модели для генерации заголовков, полученной в данной работе, предложен алгоритм выделения ключевых слов без дополнительного обучения сети.

Ключевые слова: мультизадачная модель, генерация заголовков, лемматизация, выделение ключевых слов

DOI: 10.1134/S2304487X20030074

ОБЗОР ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПОДХОДОВ

В большинстве задач анализа естественного языка используются различные инструменты предобработки текстов.

Одной из функций предобработки данных является лемматизация — это процесс приведения слова к нормальной форме, что позволяет в статистических моделях учитывать одно и то же слово в различных вариантах его написания. Существуют готовые решения, которые построены на различных методах: словарный (Pymorphy [1]), правила и регулярные выражения (Pattern [2]), машинное обучение (UDPipe [3], NLTK [4]) и другие, но все они опираются только на прямые признаки — саму словоформу и на морфологические признаки. Однако при реальной работе, морфологические признаки могут содержать ошибки. Для улучшения работы этих решений возможно использовать глубокие нейросетевые модели, предварительно обученные на большом объеме неразмеченных данных [5, 6]. При их обучении может использоваться обучение на несколько задач (пример BERT – языковая модель и модель определения, что два предложения идут друг за другом). В нашей работе мы рассматриваем возможность построить модель на дополнительных признаках мультизадачной модели BERT (см. ниже), так как они будут устойчивы и на тренировочной части, и на тестовой, а также при реальной работе, поскольку получены на большом объеме данных. Описанный выше подход может применяться и к задачам резюмирования текста, т.е. получения для входного текста (последовательности слов) более короткой последовательности, как можно более полно отражающей информацию, которая содержится во входном тексте. При этом выходная последовательность, как и входная, должна быть грамматически связанным текстом. Частным случаем задачи резюмирования является генерация заголовков к новостным статьям.

Сложность задачи заключается в том, что не существует объективной меры того, насколько слово характеризует текст — любой выбор слов является субъективным по причине разницы восприятия текстовой информации у разных людей.

Существует два способа решения задачи генерации заголовка: экстрактивный [7–9] и генеративный [10–15]. В первом случае выходная последовательность (заголовок) является подпоследовательностью входной. То есть ставится задача поиска в тексте фрагмента, который максимально соответствует истинному заголовку. При генеративном подходе заголовок генерируется моделью из слов, последовательно взятых из словаря, и может включать в себя слова, которые не содержит входная последовательность.

Другим вариантом задачи резюмирования текста является выделение ключевых фраз: определение фраз или слов текста, которые наилучшим образом характеризуют текст, т.е. являются наиболее важными с точки зрения его описания.

Для проверки разрабатываемых алгоритмов обычно используют данные, в которых авторами заранее заданы ключевые слова, например: новостные статьи и аннотации научных публикаций. При таком подходе связь заданных автором слов и текста может быть опосредована, отражать в большей степени личное мнение автора, служить целям, отличным от передачи информации (например, взаимодействие с поисковыми движками или отнесение текста к категории). Одно из возможных решений данной проблемы — сбор корпуса текстов и организация процесса выделения эталонных ключевых слов на основе агрегации данных опроса респондентов-людей.

Проблема автоматического выделения ключевых слов из текста довольно хорошо представлена в литературе. Можно выделить следующие подходы к задаче автоматического выделения ключевых слов из текста: статистический подход, подход на основе графов, машинное обучение.

Задача автоматического выделения ключевых слов может быть решена на основе следующих подходов: статистического (RAKE [16], KPMiner [17], YAKE [18], SBE [19]), подхода на основе графов (TextRank [20], SingleRank [21], TopicRank [22], PositionRank [23], MultipartiteRank [24]), подхода на основе машинного обучения (KEA [25], WINGNUS [26], GenEx [27]).

Статистический подход предполагает определение ключевых слов на основе статистических показателей текста — частоты встречаемости слов, их распределения по документам из выборки, положения слова в тексте, совместной встречаемости слов.

Подход на основе графов предполагает представление текста или его элементов в виде графа. В качестве узлов обычно выступают слова или группы слов, взвешенные связи между ними строят на основе совместной встречаемости в окне фиксированной размерности. Далее используются алгоритмы для ранжирования узлов графа (как правило, PageRank [28] или его модификации).

Подход на основе машинного обучения включает в себя несколько методов обучения с учителем, то есть внутренние коэффициенты модели предварительно настраиваются на основе обучающей выборки, в которой содержатся тексты с уже определенными эталонными ключевыми словами.

МУЛЬТИЗАДАЧНАЯ МОДЕЛЬ BERT

ВЕКТ представляет собой уже обученную модель на основе слоев multi head attention, она представлена в работе [6]. Обучение проводилось на корпусе дампов Википедии для 104 языков. При формировании корпуса, использовалось сглаживание по представительности текстов для каждого языка. Модель состоит из 12 слоев, размерность для multi head attention 768 и скрытого слоя 3072, 12 голов в multi head attention.

В процессе обучения BERT решались одновременно две задачи:

маскируемая языковая модель;

 – определение, что два предложения идут последовательно в тексте.

Маскируемая языковая модель

Для 15% токенов, случайно отбираемых каждую эпоху, модель предсказывает на выходе этот токен, при этом сам токен заменяется случайным образом на один из следующих: в 80% случаев на специальный токен-маску [MASK]; в 10% случаев заменяется на случайный токен из словаря; в 10% случаев не заменяется.

Такая замена объясняется тем, что при работе в фазе предсказания токенов [MASK] не будет и для нормальной работы модель должна встречаться с такими примерами при обучении.

МОЛОШНИКОВ и др.



Рис. 1. Схема модели для задачи лемматизации.

Определение, что два предложения идут последовательно в тексте

Для этой задачи документы делятся на предложения, в модель на вход, как одна последовательность, подаются два предложения. Предложения разделяются специальным токеном [SEP]. В начале входной последовательности добавляется специальный токен [CLS] — на выходе модель для него должна дать 1 в случае, если два предложения идут друг за другом в одном документе, или 0, если они из разных документов или частей одного документа. При обучении подается 50% процентов последовательных предложений и 50% случайно перемешанных.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ЛЕММАТИЗАЦИИ ТЕКСТОВ

Модель для лемматизации схематично представлена на рис. 1. Она состоит из следующих слоев:

1. Входы сети, их может быть до 3-х:

а. посимвольное представление словоформы, символы кодируются слоем векторного представления (Embedding, размерностью *s*);

b. полный морфологический тэг в бинарной кодировке (опционально);

с. активности из мультизадачной модели BERT, т.к. словоформа может быть представлена несколькими токенами в модели BERT, то берется усреднение выходов по этим токенам (опционально).

2. Признаки морфологии и векторное представление словоформы из BERT копируется несколько раз, по длине слоформы, и конкатенируется с каждым символом словоформы. 3. Далее идет два слоя двунаправленного LSTM, каждый слой имеет размерность 2 × *s*.

4. На выходе, каждая активность декодируется в символ полносвязным слоем с функцией активации softmax, размерность слоя по числу символов в словаре.

Размерность слоев *s* подбирается эмпирически, мы пробовали несколько вариантов: 32, 128 и 256.

Модель для генерации заголовков

Модель нейросети для генерации заголовков состоит из двух частей – энкодер и декодер (рис. 2, блоки энкодера имеют префикс "Е Т.", а декодера "D T."). Энкодеру на вход поступает текст (текст разбивается на токены – части слов, пример: слово "студентка" будет представлено двумя токенами: "студент" и "_ка") и он преобразует его в последовательность векторов для каждого элемента текста. Декодер получает на вход результат работы энкодера и сгенерированную на текущий момент часть заголовка (на первом шаге это специальный токен "[CLS]", означающий начало последовательности) (см. рис. 2). Заголовок генерируется по токенам, пока сеть не выдаст специальный токен (T) – конец заголовка или не будет достигнута максимальная заданная длина (150 токенов) (подробнее в работе [29]).

МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ

Предложен метод выделения ключевых слов на основе готовой нейронной сети для задачи генерации заголовка (описанной ранее). Особенность метода заключается в отсутствии обучения



Рис. 2. Схема сети для генерации заголовка.

модели на выделение ключевых слов, вместо этого анализируются активности готовой нейронной сети, обученной на схожей задаче. Гипотеза заключается в том, что после обучения модели генерации заголовков ее внутренние веса, сопоставленные со входными токенами, отражают, какие токены внесли больший вклад в генерацию заголовка, соответственно, какие токены (а значит и слова) наиболее информативны, а задача выделения ключевых слов и генерации заголовка похожие и направлены на краткое резюмирование текста.

Разработанный метод включает в себя следующую последовательность действий:

1) веса последнего слоя внимания (multihead attention) декодера сохраняются, так как являются входными данными алгоритма — получается матрица A размерности $|t| \times m \times n$, где |t| — число токенов входной последовательности, m — число голов слоя внимания (multihead attention), n — число токенов сгенерированного заголовка.

2) для каждого токена t_i рассчитывается сумма весов по головам — получается матрица A' размерности $|t| \times n$;

3) для каждого токена t_i рассчитывается сумма весов по словам заголовка, получается вектор оценок токенов v_{score} размерности |t|;

4) для каждого элемента wⁱ множества слов исходного текста W определяется множество токенов t_w^j , которыми было представлено слово после токенизации текста;

5) для каждого слова w^{*j*} получается максимальная оценка на основе набора токенов, которыми слово представлено:

$$score(w^{j}) = max(t_{w}^{j});$$

6) оценки слов переводятся в шкалу действительных чисел от 0 до 1 по следующей формуле:

$$norm(score(w^{j})) = \frac{score(w^{j}) - min(score(W))}{max(score(W)) - min(score(W))}$$

7) из набора слов *W* исключаются стоп-слова, производится очистка от символов (чтобы в полученных из текста словах остались только буквы);

8) для оставшихся слов находятся леммы. Если леммы разных слов совпадают (например, такое может быть у слова в разных формах), лемма получает максимальную оценку из представленных;

9) в качестве ключевых слов выбирается 25% слов, имеющих наибольший рейтинг.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка модели лемматизации проводилась на корпусе ru_syntagrus из Universal Dependencies v2.2, который использовался на соревновании CoNLL 2018, оценка проводилась скриптом с соревнований. Результаты приведены в табл. 1.

Номер эксп.	F1	max epochs	s, размер модели	pati- ence	use BERT	use morph
1	87.39	150	32	15	True	False
2	93.42	150	32	15	True	True
3	92.16	150	32	15	False	True
4	85.77	30	32	30	True	False
5	89.74	30	32	30	True	True
6	88.21	30	32	30	False	True
7	95.14	30	128	30	True	False
8	97.70	30	128	30	True	True
9	97.50	30	128	30	False	True
10	95.78	30	256	30	True	False
11	98.21	30	256	30	True	True
12	97.66	30	256	30	False	True
[30]	98.19	—	—	—	False	True

Таблица 1. Результаты оценки модели для лемматизации на корпусе Universal Dependencies 2.2 ru_syntagrus

Пояснения к таблице: F1 — точность, полученная официальным скриптом на тестовом множестве, max epochs — максимальное число эпох, которым модель могла обучаться до раннего останова (когда ошибка на валидационном множестве начинает расти), s — размер модели (см. в разделе "Модель для лемматизации текстов"), patience — число эпох, в течение которых может расти ошибка на валидационном множестве до остановки обучения, use BERT — флаг, использовались или нет признаки из мультизадачной модели, use morph — флаг, использовались или нет признаки морфологии. Для борьбы с переобучением использовался ранний останов по валидационном у множеству и загрузка весов на лучшую эпоху.

Для оценки модели генерации заголовка используется метрика Rouge-L-f, основанная на поиске самой длинной общей последовательности токенов [31], результаты оценки на корпусе РИА "Новости" приведены в табл. 2, для обучения, валидации и тестирования использовалась разбивка корпуса из статьи [32].

Число параметров рассчитывалось без учета эмбеддинг слоев и выходного слоя, так как используемая мультиязычная модель BERT имеет большой словарь, что значительно увеличивает количество параметров, однако большая часть мультиязычного словаря не встречается в корпусе.

Для оценки методов выделения ключевых слов был собран валидационный корпус текстов на основе набора данных новостей "РИА новости" с использованием краудсорсинг-платформы. Корпус включает в себя 50 текстов средней длины 2002 символа. Эталонные ключевые слова для каждого текста выбирались на основе усреднения оценок десяти пользователей.

В качестве метрик оценки методов выделения ключевых слов используется адаптация стандартных метрик *precision*, *recall* и *f1-меры*.

Формулы, по которым вычисляются метрики, представлены ниже, обозначения:

• *words* — множество слов текста, которые являлись кандидатами для оценки на краудсорсинговой платформе;

• *kw*_{valid} – ключевые слова, которые были определены респондентами на краудсорсинг-платформе, то есть те слова, средняя оценка которых

Таблица 2. Результаты оценки моделей генерации заголовка на корпусе РИА "Новости"

·····	the state of the s		1 2				
Номер эксп.	Начальная инициализация BERT	Число слоев энк.	Число параметров	Число эпох	rouge-1	rouge-2	rouge-l
1	да	3	48M	3	0.3971	0.2145	0.3735
2	да, замороженные	3	48M	3	0.3587	0.1794	0.3374
3	мультизадач.	3	48M	3	0.0793	0.0016	0.0743
4	мультизадач., заморож.	3	48M	3	0.0702	0.0049	0.0687
5	нет	3	48M	3	0.3673	0.1883	0.3463
				3	0.4096	0.2230	0.3867
6	70	6	60M	6	0.4261	0.2412	0.4013
U	да		0,111	13	0.4420	0.2566	0.4156
				23	0.4453	0.2605	0.4180
7	нет	6	69M	3	0.1426	0.0338	0.1346
				3	0.4230	0.2381	0.3995
8	да	12	112M	8	0.4472	0.2625	0.4220
				13	0.4487	0.2654	0.4235
Первое предложение	-	-	0	_	0.2590	0.1113	0.2327
	Сторон	ние реализа	ации			•	•
*PBA-Tranformer [32]	нет	-	63M	10	0.4296	0.2543	0.4002

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

Метод	Avg. Precision	Avg. Recall	Avg. f1- score
KPMiner	0.57	0.62	0.56
SBE [19]	0.38	0.97	0.53
Основанный на нейронной сети	0.45	0.51	0.46
Position Rank	0.47	0.49	0.45
Term Frequency	0.33	0.71	0.43
RAKE	0.29	0.94	0.42
YAKE	0.34	0.32	0.31
Multipartite Rank	0.33	0.31	0.30
Single Rank	0.43	0.25	0.29
Text Rank	0.35	0.16	0.20

Таблица	3.	Результаты	оценки	методов	выделения
ключевы	х сл	юв на валида	ационном	и корпусе	

по шкале от 1 до 3 составила больше 2.5 (на основе мнения десяти респондентов);

• *kw_{nonvalid}* – слова, у которых средняя оценка по шкале от 1 до 3 на основе мнения респондентов составила меньше 2.5.

 $kw_{nonvalid} = words \setminus kw_{valid};$

• *kw_{method}* — слова, которые были отнесены к ключевым на основе метода выделения ключевых слов, то есть которым метод присвоил рейтинг выше 75% квантили. В случае, если метод выделяет словосочетания, они разбиваются на отдельные слова, каждому из которых присваивается рейтинг словосочетания;

• *kw*_{nonmethod} — слова, у которых рейтинг на основе метода имеет значение ниже 75% квантили.

 $kw_{nonmethod} = words \setminus kw_{method};$

• *tp* – число истинно положительных примеров;

• *fp* — число ложно положительных примеров (ошибка второго рода);

• *fn* — число ложно отрицательных примеров (ошибка первого рода).

Для текста *i*:

$$tp_{i} = |kw_{method}^{i} \cap kw_{valid}^{i}|;$$

$$fp_{i} = |kw_{method}^{i} \cap kw_{nonvalid}^{i}|;$$

$$fn_{i} = |kw_{nonmethod}^{i} \cap kw_{valid}^{i}|;$$

$$ecision_{i} = \frac{tp_{i}}{(1 - t^{2})^{2}}; \quad recall_{i} = \frac{tp_{i}}{(1 - t^{2})^{2}};$$

$$precision_{i} = \frac{p_{i}}{(tp_{i} + fp_{i})}; \quad recall_{i} = \frac{p_{i}}{(tp_{i} + fn_{i})}$$
$$f1_{i} = \frac{2 \times precision_{i} \times recall_{i}}{(precision_{i} + recall_{i})}.$$

Агрегированная оценка для метода:



В табл. 3 представлены результаты оценки методов выделения ключевых слов на собранном валидационном корпусе.

выводы

В работе проведено комплексное исследование эффективности мультизадачных методов глубокого обучения комбинированных нейросетевых моделей на выбранном наборе задач: генерации заголовков, определения лемм и ключевых слов. В результате:

1) в задаче определения лемм добавление новых признаков к модели нейросети дает прирост на 1% по метрике F1 по сравнению со стандартным набором признаков;

2) разработанный метод резюмирования текста на задаче генерации заголовков при валидации на корпусе русскоязычных статей проекта "РИА новости" позволил достичь State-of-the-art точности 0.42 по метрике ROUGE-L, превосходит аналоги на 2%;

3) для задачи выделения ключевых слов метод на базе нейросетевой модели показывает точности 0.46 по метрике f1-score, превосходя наиболее популярные методы статистического анализа, уступая методам SBE и KPMiner.

Таким образом проведенное исследование на примере перечисленных задач продемонстрировало пользу использования векторного представления текста, полученного на базе глубоких нейросетевых моделей, предварительно обученных на большом корпусе текстовых данных с последующим обучением для целевой задачи для создания эффективных моделей решения задач текстового анализа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-37-00331 "мол_а" и с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ "Курчатовский институт", http://computing.nrcki.ru.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Korobov M*. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages. Analysis of Images, Social Networks and Texts. 2015. P. 320–332.
- 2. De Smedt T., Daelemans W. Pattern for Python. Journal of Machine Learning Research. 2012. № 13. P. 2031–2035.
- 3. *Straka M., Straková J.* Tokenizing, POS Tagging, Lemmatizing and Parsing UD 2.0 with UDPipe. In Proceedings of the CoNLL 2017 Shared Task: Multilingual Parsing from Raw Text to Universal Dependencies. 2017.
- 4. NLTK, NLTK 3.3 release: May 2018. http://www.nltk.org
- 5. Peters M.E., Neumann M., Iyyer M., Gardner M., Clark C., Lee K., Zettlemoyer L. Deep contextualized word representations. arXiv preprint arXiv:1802.05365. 2018.
- Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805. 2018. Oct 11.
- 7. *Liu Y., Lapata M.* Text summarization with pretrained encoders. arXiv preprint arXiv:1908.08345. 2019. Aug 22.
- 8. *Liu Y*. Fine-tune BERT for extractive summarization. arXiv preprint arXiv:1903.10318. 2019. Mar 25.
- 9. Chen X., Gao S., Tao C., Song Y., Zhao D., Yan R. Iterative document representation learning towards summarization with polishing. arXiv preprint arXiv:1809.10324. 2018. Sep 27.
- 10. *Stepanov M.A.* Generaciya zagolovkov novostnih statei, ispolzuya stemi, lemmi i grammemi. Kompyuternaya lingvistika i intellectual'nie tehnologii (po materialam ezhegodnoi mezhdunarodnoi konferencii "Dialog"). 2019. № 18. Additional vol.
- 11. *Gusev I.* Importance of copying mechanism for news headline generation // arXiv preprint arXiv:1904.11475. 2019.
- Gavrilov D., Kalaidin P., Malykh V. Self-attentive model for headline generation // European Conference on Information Retrieval. 2019. C. 87–93.
- 13. Sokolov A.M. Phrase-based attentional transformer dlya generacii zagolovkov. Kompyuternaya lingvistika i intellectual'nie tehnologii (po materialam ezhegodnoi mezhdunarodnoi konferencii "Dialog"). 2019. № 18. Additional vol.
- Dong L., Yang N., Wang W., Wei F., Liu X., Wang Y., Gao J., Zhou M., Hon H.W. Unified language model pre-training for natural language understanding and generation. InAdvances in Neural Information Processing Systems 2019 (P. 13042–13054).
- 15. Song K., Tan X., Qin T., Lu J., Liu T.Y. Mass: Masked sequence to sequence pre-training for language generation. arXiv preprint arXiv:1905.02450. 2019. May 7.
- Rose S., Engel D., Cramer N., Cowley W. Automatic keyword extraction from individual documents. Text mining: applications and theory. 2010. P. 1–20.
- 17. *El-Beltagy S.R., Rafea A.* KP-miner: Participation in semeval-2. Proceedings of the 5th international work-shop on semantic evaluation. 2010. P. 190–193.

- Campos R., Mangaravite V., Pasquali A., Jorge A., Nunes C., Jatowt A. YAKE! Keyword extraction from single documents using multiple local features. Information Sciences. 2020. № 509. P. 257–89.
- Gydovskikh D.V., Moloshnikov I.A., Naumov et al. A probabilistically entropic mechanism of topical clusterisation along with thematic annotation for evolution analysis of meaningful social information of internet sources. Lobachevskii Journal of Math. 2017. V. 38. P. 910–913. https://doi.org/10.1134/S1995080217050134
- 20. *Mihalcea R., Tarau P.* Textrank: Bringing order into text. Proceedings of the 2004 conference on empirical methods in natural language processing. 2004. P. 404–411.
- Wan X., Xiao J. CollabRank: towards a collaborative approach to single-document keyphrase extraction. Proceedings of the 22nd International Conference on Computational Linguistics (Coling 2008). 2008. P. 969–976.
- 22. Bougouin A., Boudin F. TopicRank: Topic ranking for automatic keyphrase extraction. 2014. № 55. P. 45–69.
- Florescu C., Caragea C. Positionrank: An unsupervised approach to keyphrase extraction from scholarly documents. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2017. V. 1. P. 1105–1115.
- 24. *Boudin F.* Unsupervised keyphrase extraction with multipartite graphs. arXiv preprint arXiv:1803.08721. 2018.
- Witten I.H., Paynter G.W., Frank E., Gutwin C., Nevill-Manning C.G. Kea: Practical automated keyphrase extraction. IGI global. Design and Usability of Digital Libraries: Case Studies in the Asia Pacific. 2005. P. 129–152.
- 26. *Nguyen T.D., Luong M.T.* WINGNUS: Keyphrase extraction utilizing document logical structure. Association for Computational Linguistics. Proceedings of the 5th international workshop on semantic evaluation. 2010. P. 166–169.
- 27. *Turney P.D.* Learning algorithms for keyphrase extraction. Information retrieval. 2000. № 2 (4). P. 303–36.
- 28. *Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T.* The pagerank citation ranking: Bringing order to the web. Stanford InfoLab, 1999.
- Moloshnikov I.A., Gryaznov A.V., Vlasov D.S., Sboev A.G. Vibor effectivnogo neirosetevogo metoda formirovaniya zagolovkov. NIYaU MIFI. VI Mezhdunarodnaya konferenciya "Lazernie, pazmennie issledovaniya i tehnologii-LaPlaz-2020", sbornik nauchnih trudov. 2020. V. 1. P. 80–81.
- Kanerva J., Ginter F., Miekka N., Leino A., Salakoski T. Turku neural parser pipeline: An end-to-end system for the conll 2018 shared task. Proceedings of the CoNLL 2018 Shared Task: Multilingual parsing from raw text to universal dependencies. 2018. P. 133–142.
- Lin C.Y., Hovy E. Automatic evaluation of summaries using n-gram co-occurrence statistics. Proceedings of the 2003 Human Language Technology Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. 2003. P. 150–157.
- Headline Generation Shared Task on Dialogue'2019, http://www.dialog-21.ru/media/4661/camerareadysubmission-157.pdf

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 236-244

Application of a Multitasking Model for Practical Tasks of Heading Generation, Definition of Lemmas and Keywords

I. A. Moloshnikov^{a,#}, A. V. Gryanov^{a,##}, D. S. Vlasov^{a,###}, R. B. Rybka^{a,####}, and A. G. Sboev^{a,b,#####}

^a National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

^b National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia [#]e-mail: ivan-rus@vandex.ru

#####e-mail: rybkarb@gmail.com ####e-mail: vfked0d@gmail.com #####e-mail: rybkarb@gmail.com ######e-mail: sag111@mail.ru

Received June 23, 2020; revised June 23, 2020; accepted July 7, 2020

Abstract—The efficiency of multitask deep learning methods for combined neural network models is comprehensively studied in application to a selected set of tasks: generating headers, defining lemmas, and keywords. The multitask model is built using Multi-head Attention layers and is used to develop models for generating headers and a model based on LSTM layers for lemmatization. Open corpuses RIA Novosti, containing news texts and headings for them, and a corpus with morphological, syntactic markup and lemmas for word forms SynTagRus from the universal dependencies project are used. For the task of highlighting keywords, we have assembled a new corpus consisting of news texts using the crowdsourcing platform. The results of the work show an increase in the accuracy by 1% in the F1 score for the lemmatization problem when using features from the multitask model compared to using only morphological features, state-of- art accuracy (0.42 ROUGE F1 score) is achieved for the title generation task. An algorithm for highlighting keywords without additional network training is proposed on the basis of the model for generating headings obtained in this work.

Keywords: multitask learning model, heading generation, lemmatization, key word highlighting

DOI: 10.1134/S2304487X20030074

REFERENCES

- 1. Korobov M. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages. Analysis of Images, Social Networks and Texts, 2015, pp. 320–332.
- 2. De Smedt T., Daelemans W. Pattern for Python. Journal of Machine Learning Research, 2012, № 13, pp. 2031–2035.
- Straka M., Straková J. Tokenizing, POS Tagging, Lemmatizing and Parsing UD 2.0 with UDPipe. In Proceedings of the CoNLL 2017 Shared Task: Multilingual Parsing from Raw Text to Universal Dependencies, 2017.
- 4. NLTK, NLTK 3.3 release: May 2018. http://www.nltk.org
- Peters M.E., Neumann M., Iyyer M., Gardner M., Clark C., Lee K., Zettlemoyer L. Deep contextualized word representations. arXiv preprint arXiv:1802.05365. 2018.
- Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805. 2018. Oct 11.

- 7. Liu Y., Lapata M. Text summarization with pretrained encoders. arXiv preprint arXiv:1908.08345, 2019. Aug 22.
- 8. Liu Y. Fine-tune BERT for extractive summarization. arXiv preprint arXiv:1903.10318. 2019. Mar 25.
- Chen X., Gao S., Tao C., Song Y., Zhao D., Yan R. Iterative document representation learning towards summarization with polishing. arXiv preprint arXiv:1809.10324. 2018. Sep 27.
- 10. Stepanov M.A. Generaciya zagolovkov novostnih statei, ispolzuya stemi, lemmi i grammemi. Kompyuternaya lingvistika i intellectual'nie tehnologii (po materialam ezhegodnoi mezhdunarodnoi konferencii "Dialog"). 2019. № 18. Additional vol.
- 11. Gusev I. Importance of copying mechanism for news headline generation //arXiv preprint arXiv:1904.11475. 2019.
- Gavrilov D., Kalaidin P., Malykh V. Self-attentive model for headline generation // European Conference on Information Retrieval. 2019. C. 87–93.
- Sokolov A.M. Phrase-based attentional transformer dlya generacii zagolovkov. Kompyuternaya lingvistika i intellectual'nie tehnologii (po materialam ezhegodnoi

mezhdunarodnoi konferencii "Dialog"). 2019. No 18. Additional vol.

- Dong L., Yang N., Wang W., Wei F., Liu X., Wang Y., Gao J., Zhou M., Hon H.W. Unified language model pre-training for natural language understanding and generation. InAdvances in Neural Information Processing Systems 2019 (pp. 13042–13054).
- Song K., Tan X., Qin T., Lu J., Liu T.Y. Mass: Masked sequence to sequence pre-training for language generation. arXiv preprint arXiv:1905.02450. 2019. May 7.
- Rose S., Engel D., Cramer N., Cowley W. Automatic keyword extraction from individual documents. Text mining: applications and theory, 2010. pp. 1–20.
- 17. El-Beltagy S.R., Rafea A. KP-miner: Participation in semeval-2. Proceedings of the 5th international work-shop on semantic evaluation, 2010. pp. 190–193.
- Campos R., Mangaravite V., Pasquali A., Jorge A., Nunes C., Jatowt A. YAKE! Keyword extraction from single documents using multiple local features. Information Sciences, 2020. № 509, pp. 257–89.
- Gydovskikh D.V., Moloshnikov I.A., Naumov et al. A probabilistically entropic mechanism of topical clusterisation along with thematic annotation for evolution analysis of meaningful social information of internet sources. Lobachevskii Journal of Math, 2017. vol. 38. pp. 910–913. https://doi.org/10.1134/S1995080217050134
- 20. Mihalcea R., Tarau P. Textrank: Bringing order into text. Proceedings of the 2004 conference on empirical methods in natural language processing, 2004.

pp. 404-411.

- Wan X., Xiao J. CollabRank: towards a collaborative approach to single-document keyphrase extraction. Proceedings of the 22nd International Conference on Computational Linguistics (Coling 2008), 2008. pp. 969–976.
- Bougouin A., Boudin F. Topic Rank: Topic ranking for automatic keyphrase extraction. 2014. № 55. pp. 45– 69.
- 23. Florescu C., Caragea C. Positionrank: An unsupervised approach to keyphrase extraction from scholarly docu-

ments. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2017, Vol. 1, pp. 1105–1115.

- 24. Boudin F. Unsupervised keyphrase extraction with multipartite graphs. arXiv preprint arXiv:1803.08721. 2018.
- Witten I.H., Paynter G.W., Frank E., Gutwin C., Nevill-Manning C.G. Kea: Practical automated keyphrase extraction. IGI global. Design and Usability of Digital Libraries: Case Studies in the Asia Pacific, 2005. pp. 129–152.
- Nguyen T.D., Luong M.T. WINGNUS: Keyphrase extraction utilizing document logical structure. Association for Computational Linguistics. Proceedings of the 5th international workshop on semantic evaluation, 2010. pp. 166–169.
- Turney P.D. Learning algorithms for keyphrase extraction. Information retrieval, 2000. № 2(4). pp. 303–36.
- 28. Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T. The pagerank citation ranking: Bringing order to the web. Stanford InfoLab, 1999.
- Moloshnikov I.A., Gryaznov A.V., Vlasov D.S., Sboev A.G. Vibor effectivnogo neirosetevogo metoda formirovaniya zagolovkov. NIYaU MIFI. VI Mezhdunarodnaya konferenciya "Lazernie, pazmennie issledovaniya i tehnologii-LaPlaz-2020", sbornik nauchnih trudov. 2020. Vol. 1. pp. 80–81.
- 30. Kanerva J., Ginter F., Miekka N., Leino A., Salakoski T. Turku neural parser pipeline: An end-to-end system for the conll 2018 shared task. Proceedings of the CoNLL 2018 Shared Task: Multilingual parsing from raw text to universal dependencies, 2018, pp. 133–142.
- Lin C.Y., Hovy E. Automatic evaluation of summaries using n-gram co-occurrence statistics. Proceedings of the 2003 Human Language Technology Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics, 2003, pp. 150–157.
- 32. Headline Generation Shared Task on Dialogue'2019, http://www.dialog-21.ru/media/4661/camerareadysubmission-157.pdf

244

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, c. 245-255

> ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА <u>–</u> И ИНФОРМАТИКА –

УДК 621.039

Prime Conditions for Integers

© 2020 г. Prof. Dr. André Maïsseu*

University of Paris 1-La Sorbonne, Paris, 75231, France *e-mail: andre.maisseu@wanadoo.fr, www.andre-maisseu.org Received May 8, 2020; Revised May 25, 2020; Accepted June 9, 2020

In this paper we suggest to break down natural numbers, P, in two coefficients, i and j, reported to their subscript N which is defined by the equation $P = 6N \pm 1$; i and j are defined by an other equation, $N = 6 * |i| * |j| \pm (i \pm j)$. N is a natural whole number but i and j are not necessarily natural whole numbers. They could be irrational. By using such unusual approach of number theory, we would propose a simple relation between two square numbers as a necessary condition for any prime number. We would like to suggest that such relationship could be looked as a corollary of the last Fermat's theorem.

Keywords: natural number, prime numbers, composite number, rational, irrational, Fermat's theorem **DOI:** 10.1134/S2304487X20030050

INTRODUCTION

According to A. Maïsseu and B. Maïsseu [1], for any number $P \in F_P$, having the form $P = 6N \pm 1$, it is possible to find *i* and *j* such that $N = 6*|i|*|j| \pm (i \pm j)$. This rule implicitly assumes that *i* and *j* are natural numbers:

$$i, j \in \mathbb{Z} = \{-3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, ...\}.$$

i and *j* are called the coefficients of subscript N_P , of a number *P*:

• When *i* and *j* are natural numbers, strictly rational, *P* is a composite number;

• When *i* and *j* are irrational, *P* is a prime number.

We have $S = i \pm j$, et $\Pi = |i| * |j|$.

According to the relation between the sum and the product of the roots of the equation of second degree

$$N = 6 \Pi \pm S,$$

i and *j* are the roots of the second degree equation.

$$X^2 - SX + \Pi = 0.$$

With Δ called the determinant of such second degree equation

$$\Delta = S^2 - 4\Pi \ge 0$$

there comes the condition for P to be a prime number which is proposed below.

1. THE FUNDAMENTAL EQUATION

All prime numbers, P > 3, can be written in the form

$$P = 6N \pm 1$$

with *N*, called suscript of the number *P*, defined by the equation:

$$P = (\pm 1) \mod 6$$
.

However, not all numbers having this form are prime numbers. This family of numbers, F_P , hence comprises all prime numbers and composite numbers.

2. TWO SUB-SETS \mathcal{F}_{V} AND \mathcal{F}_{VII}

The prime and composites numbers defined by the equation $P = 6N \pm 1$ can be broken down into two subsets.

1. \mathcal{F}_{V} for P = 6N - 1, *i* and *j* have different signs; their product is negative, $\Pi(i, j) < 0$.

2. \mathcal{F}_{VII} for P = 6N + 1, *i* and *j* have the same sign; their product is positive, $\Pi(i, j) > 0$.

Each of the two sub-sets can be broken down into six sub-families.

2.1.
$$\mathcal{F}_{V}$$
: $P = 6N - 1$; *i* and *j* have different signs;
 $\Pi(i, j) = i * j < 0$

The six sub-families of \mathcal{F}_{V} are:

2.1.1. $P \in \mathcal{F}_{V}$	[-1] with $P = (-1) + (-1)$	ŀ k *	$36 \rightarrow$	$P \equiv$
$\equiv (-1) \mod 36 \rightarrow 1$	$N \equiv 0 \mod 6$			

-							
Р	Ν	Ι	J	Δ	$\mathbf{P}=9\Delta-\varkappa^2$	X = 6i - 1	Y = 6j + 1
-1	0	$\sqrt{0}$	$-\sqrt{0}$	0	$0 = 0 - 1^2$	$(\sqrt{0} * 6) - 1$	$(\sqrt{0} * 6) + 1$
35	6	1	-1	2 ²	$35 = 6^2 - 1^2$	5	7
71	12	$\sqrt{2}$	$-\sqrt{2}$	8	$71 = 72 - 1^2$	$(\sqrt{2} * 6) - 1$	$(\sqrt{2} * 6) + 1$
107	18	$\sqrt{3}$	$-\sqrt{3}$	12	$107 = 108 - 1^2$	$(\sqrt{3} * 6) - 1$	$(\sqrt{3}*6) + 1$

143	24	2	-2	16	$143 = 12^2 - 1^2$	11	13			
179	30	$\sqrt{5}$	$-\sqrt{5}$	20	$179 = 180 - 1^2$	$(\sqrt{5} * 6) - 1$	$(\sqrt{5}*6) + 1$			
215	36	1	-7	8 ²	$215 = 24^2 - 19^2$	5	43			
251	42	$\sqrt{7}$	$-\sqrt{7}$	28	$251 = 252 - 1^2$	$(\sqrt{7} * 6) - 1$	(√7 * 6)+1			
287	48	7	-1	8 ²	$287 = 24^2 - 17^2$	7	41			
323	54	3	-3	6 ²	$323 = 18^2 - 1^2$	17	19			
359	60	$\sqrt{10}$	$-\sqrt{10}$	40	$359 = 360 - 1^2$	$(\sqrt{10} * 6) - 1$	$(\sqrt{10} * 6) + 1$			
395	66	1	-13	14 ²	$395 = 42^2 - 37^2$	5	79			
431	72	$\sqrt{12}$	$-\sqrt{12}$	48	$431 = 432 - 1^2$	$(\sqrt{12} * 6) - 1$	$(\sqrt{12} * 6) + 1$			
aso.	aso									

2.1.2. $P \in \mathcal{F}_V[5]$ with $P = 5 + k * 36 \rightarrow P \equiv \equiv 5 \mod 36 \rightarrow N \equiv 1 \mod 6$

Р	N	Ι	J	Δ	$\mathbf{P}=9\Delta-\varkappa^2$	X = 6i - 1	Y = 6j + 1
5	1	1	0	1	$5 = 3^2 - 2^2$	1	5
41	7	$(1 + \sqrt{5})/2$	$(1 - \sqrt{5})/2$	5	$41 = 45 - 2^2$	$(1+\sqrt{5})$ * 3 - 1	$(1 - \sqrt{5})$ * 3 + 1
77	13	2	-1	9	$77 = 9^2 - 2^2$	7	11
113	19	$(1 + \sqrt{13})/2$	$(1 - \sqrt{13})/2$	13	$113 = 117 - 2^2$	$(1 + \sqrt{13})$ * 3 - 1	$(1 - \sqrt{13})$ * 3 + 1
149	25	$(1 + \sqrt{17})/2$	$(1 - \sqrt{17})/2$	17	$149 = 153 - 2^2$	$(1 + \sqrt{17})$ * 3 - 1	$(1 - \sqrt{17})$ * 3 + 1
185	31	1	-6	21	$185 = 21^2 - 16^2$	5	37
221	37	3	-2	25	$221 = 15^2 - 2^2$	13	17
257	43	$(1 + \sqrt{29})/2$	$(1 - \sqrt{29})/2$	29	$257 = 261 - 2^2$	$(1+\sqrt{29})$ * 3-1	$(1 - \sqrt{29})$ * 3 + 1
293	49	$(1 + \sqrt{33})/2$	$(1 - \sqrt{33})/2$	33	$293 = 297 - 2^2$	$(1+\sqrt{33})$ * 3-1	$(1 - \sqrt{33})$ * 3 + 1
329	55	8	-1	37	$329 = 27^2 - 20^2$	7	47
365	61	1	-12	41	$365 = 39^2 - 34^2$	5	73
401	67	$(1 + \sqrt{45})/2$	$(1 - \sqrt{45})/2$	45	$401 = 405 - 2^2$	$(1+\sqrt{45})$ *3-1	$(1 - \sqrt{45})$ * 3 + 1

aso...

2.1.3. $P \in \mathcal{F}_V$ [11] with $P = 11 + k * 36 \rightarrow P \equiv \equiv 11 \mod 36 \rightarrow N \equiv 2 \mod 6$

Р	N	i	J	Δ	$\mathbf{P}=9\Delta-\varkappa^2$	Х	Y
11	2	2	0	2 ²	$11 = 6^2 - 5^2$	1	11
47	8	$(1 + \sqrt{2})$	$(1 - \sqrt{2})$	8	$47 = 72 - 5^2$	$[1+\sqrt{2}]$ * 6 - 1	$[1-\sqrt{2}]$ * 6 + 1
83	14	$(1 + \sqrt{3})$	$(1 - \sqrt{3})$	12	$83 = 108 - 5^2$	$[1+\sqrt{3}]$ * 6 - 1	$[1-\sqrt{3}]$ * 6 + 1
119	20	3	-1	4 ²	$119 = 12^2 - 5^2$	7	17
155	26	1	-5	6 ²	$155 = 18^2 - 13^2$	5	31
191	32	$(1 + \sqrt{6})$	(1 − √6)	24	$191 = 216 - 5^2$	$[1+\sqrt{6}]$ * 6 - 1	$[1-\sqrt{6}]$ * 6 + 1
227	38	$(1 + \sqrt{7})$	(1 − √7)	28	$227 = 252 - 5^2$	$[1 + \sqrt{7}]$ * 6 - 1	$[1-\sqrt{7}]$ * 6 + 1

263	44	$(1 + \sqrt{8})$	$(1 - \sqrt{8})$	32	$263 = 288 - 5^2$	$[1+\sqrt{8}]$ * 6 - 1	$[1-\sqrt{8}]$ * 6 + 1
299	50	4	-2	6 ²	$299 = 18^2 - 5^2$	13	23
335	56	1	-11	12 ²	$335 = 36^2 - 31^2$	5	67
371	62	-1	9	10 ²	$371 = 30^2 - 23^2$	7	53
407	68	2	-6	8 ²	$407 = 24^2 - 13^2$	11	37

aso...

2.1.4. $P \in \mathcal{F}_{V}$ [17] with $P = 17 + k * 36 \rightarrow P \equiv \equiv 17 \mod 36 \rightarrow N \equiv 3 \mod 6$

Р	N	i	j	Δ	$\mathbf{P}=9\Delta-\varkappa^2$	Х	Y
17	3	3	0	3 ²	$17 = 9^2 - 8^2$	6 * 8 – 1	0 * 0 + 1
53	9	$(3 + \sqrt{13})/2$	$(3 - \sqrt{13})/2$	$13 = 3^2 + 4 * 1$	$53 = 117 - 8^2$	$[3 + \sqrt{13}]$ * 3 - 1	$[3-\sqrt{13}]$ * 3 + 1
89	15	$(3 + \sqrt{17})/2$	$(3 - \sqrt{17})/2$	$17 = 3^2 + 4 * 2$	$89 = 153 - 8^2$	$[3+\sqrt{17}]*$ 3-1	$[3-\sqrt{17}]*$ 3+1
125	21	1	-4	5 ²	$125 = 15^2 - 10^2$	5	25
161	27	4	-1	5 ²	$161 = 15^2 - 8^2$	23	7
197	33	$(3 + \sqrt{29})/2$	$(3 - \sqrt{29})/2$	29	$197 = 261 - 8^2$	$[3 + \sqrt{29})$ * 3 - 1	$[3 - \sqrt{29}]$ * 3 + 1
233	39	$(3 + \sqrt{33})/2$	$(3-\sqrt{33})/2$	33	$233 = 297 - 8^2$	$[3 + \sqrt{33}]$ * 3 - 1	$[3-\sqrt{33}]$ * 3 + 1
269	45	$(3 + \sqrt{37})/2$	$(3 - \sqrt{37})/2$	37	$269 = 333 - 8^2$	$[3 + \sqrt{37}]$ * 3 - 1	$[3 - \sqrt{37}]$ * 3 + 1
305	51	1	-10	11 ²	$305 = 33^2 - 28^2$	5	61
341	57	2	-5	7 ²	$341 = 21^2 - 10^2$	11	31
377	63	5	-2	7 ²	$377 = 21^2 - 8^2$	29	13
413	69	10	-1	11 ²	$413 = 33^2 - 26^2$	59	7

etc...

2.1.5. $P \in \mathcal{F}_{V}$ [23] with $P = 23 + k * 36 \rightarrow P \equiv \equiv 23 \mod 36 \rightarrow N \equiv 4 \mod 6$

	Р	Ν	i	j	Δ	$\mathbf{P}=9\Delta-\varkappa^2$	Х	Y
	23	4	4	0	4 ²	$23 = 12^2 - 11^2$	23	1
=	59	10	$2 + \sqrt{5}$	$2 - \sqrt{5}$	20	$59 = 180 - 11^2$	$(2+\sqrt{5})$ * 6 - 1	$(2-\sqrt{5})*6$ + 1
_	95	16	1	-3	4 ²	$95 = 12^2 - 7^2$	5	19
_	131	22	$2 + \sqrt{7}$	$2 - \sqrt{7}$	28	$131 = 252 - 11^2$	$(2+\sqrt{7})$ * 6 - 1	$(2-\sqrt{7})$ * 6 + 1
	167	28	$2 + \sqrt{8}$	$2 - \sqrt{8}$	32	$167 = 288 - 11^2$	$(2+\sqrt{8})$ * 6 - 1	$(2-\sqrt{8})$ * 6 + 1
_	203	34	5	-1	6 ²	$203 = 18^2 - 11^2$	29	7
_	239	40	$2 + \sqrt{10}$	$2 - \sqrt{10}$	40	$239 = 360 - 11^2$	$(2 + \sqrt{10})$ * 6 - 1	$(2 - \sqrt{10})$ * 6 - 1
_	275	46	2	-4	6 ²	$275 = 18^2 - 7^2$	11	25
	311	52	$2 + \sqrt{12}$	$2 - \sqrt{12}$	48	$311 = 432 - 11^2$	$(2 + \sqrt{12})$ * 6 - 1	$(2 - \sqrt{12})$ * 6 + 1
_	347	58	$2 + \sqrt{13}$	$2 - \sqrt{13}$	52	$347 = 468 - 11^2$	$(2 + \sqrt{13})$ * 6 - 1	$(2 - \sqrt{13})$ * 6 + 1

PRIME CONDITIONS FOR INTEGERS

383	64	$2 + \sqrt{14}$	$2 - \sqrt{14}$	56	$383 = 504 - 11^2$	$(2 + \sqrt{14})$ * 6 - 1	$(2 - \sqrt{14})$ * 6 + 1
419	70	$2 + \sqrt{15}$	$2 - \sqrt{15}$	60	$419 = 540 - 11^2$	$(2 + \sqrt{15})$ * 6 - 1	$(2 - \sqrt{15})$ * 6 + 1
etc.			•				

2.1.6. $P \in \mathcal{F}_{V}$ [29] with $P = 29 + k * 36 \rightarrow P \equiv \equiv 29 \mod 36 \rightarrow N \equiv 5 \mod 6$

Р	N	i	j	Δ	$\mathbf{P}=9\Delta-\varkappa^2$	Х	Y	
29	5	5	0	5 ²	$29 = 15^2 - 14^2$	29	1	-
65	11	1	-2	3 ²	$65 = 9^2 - 4^2$	5	13	
101	17	$(5+\sqrt{33})/2$	$(5 - \sqrt{33})/2$	33	$101 = 297 - 14^2$	$(5+\sqrt{33})$ * 3-1	$(5-\sqrt{33})$ * 3+1	-
137	23	$(5 + \sqrt{37})/2$	$(5 - \sqrt{37})/2$	37	$137 = 333 - 14^2$	$(5+\sqrt{37})$ * 3 - 1	$(5 - \sqrt{37})$ * 3 +1	_
173	29	$(5 + \sqrt{41})/2$	$(5 - \sqrt{41})/2$	41	$173 = 369 - 14^2$	$(5+\sqrt{41})$ * 3 - 1	$(5 - \sqrt{41})$ * 3 + 1	
209	35	2	-3	5 ²	$209 = 15^2 - 4^2$	11	19	_
245	41	6	-1	7 ²	$245 = 21^2 - 14^2$	35	7	-
281	47	$(5+\sqrt{53})/2$	$(5 - \sqrt{53})/2$	53	$281 = 477 - 14^2$	$(5+\sqrt{53})$ * 3 - 1	$(5-\sqrt{53})$ * 3 + 1	-
317	53	$(5 + \sqrt{57})/2$	$(5 - \sqrt{57})/2$	57	$317 = 513 - 14^2$	$(5+\sqrt{57})$ * 3 - 1	$(5 - \sqrt{57})$ * 3 + 1	
353	59	$(5 + \sqrt{61})/2$	$(5 - \sqrt{61})/2$	61	$353 = 549 - 14^2$	$(5+\sqrt{61})$ * 3 - 1	$(5 - \sqrt{61})$ * 3 + 1	-
389	65	$(5 + \sqrt{65})/2$	$(5 - \sqrt{65})/2$	65	$389 = 585 - 14^2$	$(5+\sqrt{65})$ * 3 - 1	$(5 - \sqrt{65})$ * 3 + 1	-
425	71	3	-4	7 ²	$425 = 21^2 - 4^2$	17	25	-

2.2. \mathcal{F}_{VII} : P = 6N + 1; *i* and *j* have same sign; $\Pi(i, j) = i * j > 0$

The six sub-families of \mathcal{F}_{VII} are:

2.2.1. <i>P</i> ∈	\mathcal{F}_{VII} [1] with $P = 1 + k * 36 \rightarrow P \equiv$
$\equiv 1 \mod 36 \rightarrow$	$N \equiv 0 \mod 6$

Р	N	i	J	Δ	$\mathbf{P} = -9\Delta - + \varkappa^2$	Х	Y
1	0	0	0	0	$1 = 1^2 - 9 * 0^2$	1	1
37	6	6	0	6 ²	$37 = 19^2 - 9 * 6^2$	37	1
73	12	$3 + \sqrt{8}$	$3 - \sqrt{8}$	32	$73 = 19^2 - 8 * 36$	$(3+\sqrt{8})$ * 6 + 1	$ (3-\sqrt{8}) $ * 6 + 1
109	18	3 + √7	$3 - \sqrt{7}$	28	$109 = 19^2 - 7 * 36$	$(3 + \sqrt{7})$ * 6 + 1	$ (3-\sqrt{7}) $ * 6 + 1
145	24	-5	-1	4 ²	$145 = 17^2 - 12^2$	29	5
181	30	$3 + \sqrt{5}$	$3 - \sqrt{5}$	20	$181 = 19^2 - 5 * 36$	$(3+\sqrt{5})$ * 6 + 1	$ (3-\sqrt{5}) $ * 6 + 1
217	36	5	1	4 ²	$217 = 19^2 - 12^2$	7	31
253	42	-4	-2	2 ²	$253 = 17^2 - 6^2$	23	11
289	48	-3	-3	0 ²	$289 = 17^2 - 0^2$	17	17
325	54	4	2	2 ²	$325 = 19^2 - 6^2$	25	13

	54	-11	-1	10 ²	$325 = 35^2 - 30^2$	65	5
361	60	3	3	0 ²	$361 = 19^2 - 0^2$	19	19
397	66	$6 + \sqrt{27}$	$6 - \sqrt{27}$	108	$397 = 37^2 - 27 * 36$	$(6 + \sqrt{27})$ * 6 + 1	$ (6-\sqrt{27}) *$ 6+1
433	72	$6 + \sqrt{26}$	$6 - \sqrt{26}$	104	$433 = 37^2 - 26 * 36$	$(6+\sqrt{26})* 6+1$	$ (6+\sqrt{26}) *$ 6+1

aso...

2.2.2. $P \in \mathcal{F}_{\text{VII}}$ [7] with $P = (7) + k * 36 \rightarrow P \equiv \equiv 7 \mod 36 \rightarrow N \equiv 1 \mod 6$

Р	N	i	J	Δ	$\mathbf{P} = \mathbf{x}^2 - 9\Delta$	Х	Y
7	1	1	0	1	$7 = 4^2 - 9 * 1$	7	1
43	7	$\frac{(-5+\sqrt{17})}{2}$	$(-5 - \sqrt{17})/2$	17	$43 = 14^2 - 9 * 17$	$(-5+\sqrt{17})$ * 3-1	$(-5-\sqrt{17})$ * 3-1
79	13	$(-5+\sqrt{13})/2$	$(-5 - \sqrt{13})/2$	13	$79 = 14^2 - 9 * 13$	$(-5+\sqrt{13})$ * 3 - 1	$(-5-\sqrt{13})$ * 3 - 1
115	19	-1	-4	3 ²	$115 = 14^2 - 9^2$	5	23
151	25	$(-5 + \sqrt{5})/2$	$(-5 - \sqrt{5})/2$	5	$151 = 14^2 - 9 * 5$	$(-5+\sqrt{5})$ * 3 - 1	$(-5-\sqrt{5})$ * 3 - 1
187	31	-2	-3	1	$187 = 14^2 - 3^2$	11	17
223	37	$(-11 + \sqrt{89})/2$	$(-11 - \sqrt{89})/2$	89	$223 = 32^2 - 9 * 89$	$(-11+\sqrt{89})$ * 3 - 1	$(-11 - \sqrt{89})$ * 3 - 1
259	43	1	6	5 ²	$259 = 22^2 - 15^2$	7	37
295	49	-1	-10	9 ²	$295 = 32^2 - 27^2$	5	59
331	55	$(-11 + \sqrt{77})/2$	$(-11 - \sqrt{77})/2$	77	$331 = 32^2 - 9 * 77$	$(-11+\sqrt{77})$ * 3 - 1	$(-11 - \sqrt{77})$ * 3 - 1
367	61	$(-11 + \sqrt{73})/2$	$(-11 - \sqrt{73})/2$	7	$367 = 32^2 - 9 * 73$	$(-11+\sqrt{73})$ * 3 - 1	$(-11 - \sqrt{73})$ * 3 - 1
403	67	2	5	3 ²	$403 = 22^2 - 9^2$	13	31

aso...

2.2.3. $P \in \mathcal{F}_{\text{VII}}$ [13] with $P = (13) + k * 36 \rightarrow P \equiv \equiv 13 \mod 36 \rightarrow N \equiv 2 \mod 6$

Р	Ν	i	J	Δ	$\mathbf{P} = \mathbf{x}^2 - 9\Delta$	Х	Y
13	2	2	0	2 ²	$13 = 7^2 - 6^2$	13	1
49	8	1	1	0	$49 = 7^2 - 3^2$	7	7
85	14	-3	-1	2 ²	$85 = 11^2 - 6^2$	17	5
121	20	-2	-2	4 ²	$121 = 11^2 - 3^2$	11	11
157	26	$(-8 + \sqrt{52})/2$	$(-8 - \sqrt{52})/2$	52	$157 = 25^2 - 9 * 52$	$ (-8+\sqrt{52}) $ * 3 + 1	$ (-8 - \sqrt{52}) $ * 3 + 1
193	32	$(-8 + \sqrt{48})/2$	$(-8 - \sqrt{48})/2$	48	$193 = 25^2 - 9 * 48$	$ (-8+\sqrt{48}) $ * 3 + 1	$ (-8 - \sqrt{48}) $ * 3 + 1
229	38	$(-8 + \sqrt{44})/2$	$(-8 - \sqrt{44})/2$	44	$229 = 25^2 - 9 * 44$	$ (-8+\sqrt{44}) $ * 3 + 1	$ (-8 - \sqrt{44}) $ * 3 + 1
265	44	-9	-1	8 ²	$265 = 29^2 - 24^2$	53	5
301	50	7	1	6 ²	$301 = 25^2 - 18^2$	43	7
337	56	$(-8 + \sqrt{32})/2$	$(-8 - \sqrt{32})/2$	32	$337 = 25^2 - 9 * 32$	$ (-8+\sqrt{32}) $ *3+1	$ (-8 - \sqrt{32}) $ * 3 + 1

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

373	62	$(-8 + \sqrt{28})/2$	$(-8 - \sqrt{28})/2$	28	$373 = 25^2 - 9 * 28$	$ (-8+\sqrt{28}) $ * 3 + 1	$ (-8 - \sqrt{28}) $ * 3 + 1
409	68	$(-8 + \sqrt{24})/2$	$(-8 - \sqrt{24})/2$	24	$409 = 25^2 - 9 * 24$	$ (-8+\sqrt{24}) $ * 3 + 1	$ (-8-\sqrt{24}) $ * 3 + 1

aso ...

2.2.4. $P \in \mathcal{F}_{VII}$ [19] with $P = (19) + k * 36 \rightarrow P \equiv$ \equiv 19 mod 36 \rightarrow $N \equiv$ 3 mod 6

Р	N	i	J	Δ	$\mathbf{P} = \varkappa^2 - 9\Delta$	Х	Y
19	3	3	0	3 ²	$19 = 10^2 - 9^2$	19	1
55	9	-1	-2	1	$55 = 8^2 - 3^2$	5	11
91	15	1	2	1	$91 = 10^2 - 3^2$	7	13
127	21	$(9 + \sqrt{73})/2$	$(9 - \sqrt{73})/2$	73	$127 = 28^2 - 9 * 73$	$(9+\sqrt{73})$ * 3+1	$(9 - \sqrt{73})$ * 3 + 1
163	27	$(9 + \sqrt{69})/2$	$(9 - \sqrt{69})/2$	69	$163 = 28^2 - 9 * 69$	$(9+\sqrt{69})$ * 3 + 1	$(9 - \sqrt{69})$ * 3 + 1
199	33	$(9 + \sqrt{65})/2$	$(9 - \sqrt{65})/2$	65	$199 = 28^2 - 9 * 65$	$(9+\sqrt{65})$ * 3 + 1	$(9 - \sqrt{65})$ * 3 + 1
235	39	-1	-8	7 ²	$235 = 26^2 - 21^2$	5	47
271	45	$(9 + \sqrt{57})/2$	(9 − √57)/2	57	$271 = 28^2 - 9 * 57$	$(9+\sqrt{57})$ * 3 + 1	$(9 - \sqrt{57})$ * 3 + 1
307	51	$(9 + \sqrt{53})/2$	$(9 - \sqrt{53})/2$	55	$307 = 28^2 - 9 * 53$	$(9+\sqrt{53})$ * 3 + 1	$(9 - \sqrt{53})$ * 3 + 1
343	57	1	8	7 ²	$343 = 28^2 - 21^2$	7	49
379	63	$(9 + \sqrt{45})/2$	$(9 - \sqrt{45})/2$	45	$379 = 28^2 - 9 * 45$	$(9 + \sqrt{45})$ * 3 + 1	$(9 - \sqrt{45})$ * 3 + 1
415	69	-1	-14	13 ²	$415 = 44^2 - 39^2$	5	83

aso...

2.2.5. $P \in \mathcal{F}_{\text{VII}}$ [25] with $P = (25) + k * 36 \rightarrow P \equiv$ $\equiv 25 \mod 36 \rightarrow N \equiv 4 \mod 6$

Р	N	i	J	Δ	$\mathbf{P} = \varkappa^2 - 9\Delta$	Х	Y
25	4	0	4	4 ²	$25=13^2-12^2$	1	25
61	10	$(-4 + \sqrt{13})$	(−4 − √13)	52	$61 = 23^2 - 9 * 52$	$(-4 + \sqrt{13})$ * 6 - 1	$(-4 - \sqrt{13})$ * 6 - 1
97	16	$(-4 + \sqrt{12})$	$(-4 - \sqrt{12})$	48	$97 = 23^2 - 9 * 48$	$(-4 + \sqrt{12})$ * 6 - 1	$(-4 - \sqrt{12})$ * 6 - 1
133	22	1	3	2 ²	$133 = 13^2 - 6^2$	7	19
169	28	2	2	0	$169 = 13^2 - 9 * 0$	13	13
205	34	-1	-7	6 ²	$205 = 23^2 - 18^2$	5	41
241	40	$(-4 + \sqrt{8})$	$(-4 - \sqrt{8})$	32	$241 = 23^2 - 9 * 32$	$(-4 + \sqrt{8})$ * 6 - 1	$(-4 - \sqrt{8})$ * 6 - 1
277	46	(−4 + √7)	(−4 − √7)	28	$277 = 23^2 - 9 * 28$	$(-4 + \sqrt{7})$ * 6 - 1	$(-4 - \sqrt{7})$ * 6 - 1
313	52	$(-4 + \sqrt{6})$	(−4 − √6)	24	$313 = 23^2 - 9 * 24$	$(-4 + \sqrt{6})$ * 6 - 1	$(-4 - \sqrt{6})$ * 6 - 1
349	58	$(-\overline{4} + \sqrt{5})$	$(-4 - \sqrt{5})$	20	$349 = 23^2 - 9 * 20$	$(-4 + \sqrt{5})$ * 6 - 1	$(-4 - \sqrt{5})$ * 6 - 1
385	64	-1	-13	12 ²	$385 = 41^2 - 36^2$	5	77

		1	9	8 ²	$385 = 31^2 - 24^2$	7	55
		-2	-6	4 ²	$385 = 23^2 - 12^2$	11	35
421	70	$(-4 + \sqrt{3})$	(−4 − √3)	12	$421 = 23^2 - 9^*12$	$(-4 + \sqrt{3})$ * 6 - 1	$(-4 - \sqrt{3})$ * 6 - 1
000							

aso...

2.2.6. $P \in \mathcal{F}_{VII}$ [31] with $P = (31) + k * 36 \rightarrow P \equiv$ \equiv 31 mod 36 \rightarrow $N \equiv$ 5 mod 6

Р	N	i	J	Δ	$\mathbf{P} = \varkappa^2 - 9\Delta$	Х	Y
31	5	5	0	5 ²	31 = 16 - 9 * 25	31	1
67	11	$(-7 + \sqrt{37})/2$	$(-7 - \sqrt{37})/2$	37	$67 = 20^2 - 9 * 37$	$ (-7+\sqrt{37}) $ * 3-1	$ (-7-\sqrt{37}) $ * 3-1
103	17	$(-7 + \sqrt{33})/2$	$(-7 - \sqrt{33})/2$	33	$103 = 20^2 - 9 * 33$	$ (-7+\sqrt{33}) $ *3-1	$ (-7-\sqrt{33}) $ *3-1
139	23	$(-7 + \sqrt{29})/2$	$(-7 - \sqrt{29})/2$	29	$133 = 20^2 - 9 * 29$	$ (-7+\sqrt{29}) $ * 3-1	$ (-7-\sqrt{29}) $ * 3-1
175	29	-1	-6	5 ²	$175 = 20^2 - 9 * 25$	5	35
	29	1	4	3^{2}	$175 = 16^2 - 9 * 9$	7	25
211	35	$(-7 + \sqrt{21})/2$	$(-7 - \sqrt{21})/2$	21	$211 = 20^2 - 9 * 21$	$ (-7+\sqrt{21}) $ * 3-1	$ (-7-\sqrt{21}) $ * 3-1
247	41	2	3	1^{2}	$247 = 16^2 - 9 * 1$	13	19
283	47	$(-7 + \sqrt{13})/2$	$(-7 - \sqrt{13})/2$	13	$283 = 20^2 - 9 * 13$	$ (-7+\sqrt{13}) $ * 3-1	$ (-7 - \sqrt{13}) $ * 3 - 1
319	53	-2	-5	3 ²	$319 = 20^2 - 9*9$	11	29
355	59	-1	-12	11 ²	$355 = 38^2 - 9 * 121$	5	71
391	65	-3	-4	1^2	$391 = 20^2 - 1*9$	17	23
427	71	1	10	9 ²	$427 = 34^2 - 9 * 81$	7	61
aso)						

2.3. Such relations are insufficient for qualifying prime number

It is easy to check that these relations are insufficient to check the quality of any number as prime or composite.

3. SOME RELATIONS: DIFFERENCE OF TWO SQUARE NUMBERS

Regarding Stirling:

- $Y^2 X^2 = (Y X) + 2 [C_{(2,Y)} C_{(2,X)}];$
- $(n+1)^2 n^2 = 2n+1;$

• The difference between two square consecutive numbers is an odd number; reciprocally, any odd number is the difference between two square consecutive numbers.

$$(n+1)^2 - n^2 = 2n+1$$

Hence the well-known rule:

"Any number is equal to the difference between two square numbers if it is the sum of consecutive odd numbers."

For example:

$$40 = 7^2 - 3^2 = 13 + 11 + 9 + 7 = [(13 + 7)/2] * 4 = 40.$$

4. PRIME CONDITIONS FOR P-

4.1. Determination of indice
$$u$$

 $u = (i + j + 2)/6,$
 $i + j = 6u - 2.$

So what:

$$N = 6ij + i + j = 6ij + 6u - 2.$$

4.2. The co-first indice
$$M'_P$$

4.2.1.

Here is Δ , determinant of the second degree equation describing the relation between the sum and the product of the coefficients *i* and *j* of N_P , subscript of P.

So what

$$\Delta = S^2 - 4\Pi.$$

We have also

$$N = 6\Pi \pm S.$$

P is a composite number, if Δ is square number. If not, P is a prime number; the roots *i* and *j* of the second degree equation, which are the coefficients of N_P , are irrational.

Looking for the prime quality of P, is looking for Δ as a square number.

Example:

$$P = 2783$$
, $N = 464$; $(i, j) = [4, -20]$.

We are going to use the well known incremental process; the dividend, N_P (also the subscript o P) et and the divider (6) stay unchanged.

Example:

• N = 464 = 6 * 77 + 2 bar $\Delta = 2^2 - 4(-77) = 312$ that's not a square number;

• N = 464 = 6 * 78 - 4 bar $\Delta = 4^2 - 4(-78) = 328$ that's not a square number;

• N = 464 = 6 * 79 - 10 bar $\Delta = 10^2 - 4(-79) = 416$ that's not a square number;

• N = 464 = 6 * 80 - 16 bar $\Delta = 16^2 - 4(-80) = 576 = 312 + 264 = 24^2$.

It is easy to check $264 = 16C_{(1,u)} + 72C_{(2,u)} = III$ with u = 3 and $312 = (-8) + 68C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = M'_P$ with i = 4 and j = (-20).

That means: $\Delta = M'_P + \coprod = 312 + 264 = 576 = 24^2$.

4.2.2. Relationships for co-first indice M'_{P}

4.2.2.1. For $P \in \mathcal{F}_{V}$: P = 6N - 1; *i* and *j* have opposite signs, $\Pi < 0$

• $P \in \mathcal{F}_{V}[-1]$ with P = (-1) + k * 36

For i > 0, j < 0 and j > i, that's to say S < 0; here comes for M'_{P} :

 $(-4) + 28 C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} | (-8) + 52C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} | (-12) + 76C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} | (-16) + 100C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} | (-20) + 124 C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} | Etc...$

For
$$i < 0, j > 0$$
 and $j > i$, that's to say $S > 0$; here comes for M'_{P} .

$0 + 4C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$4 + 28C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$8 + 52C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$12 + 76C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$16 + 100C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc

• $P \in \mathcal{F}_{V}[5]$ with P = 5 + k * 36

For i > 0, j < 0 and j > i, that's to say S < 0; here comes for M'_{P_i}

 $(-3) + 24C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} (-7) + 48C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} (-11) + 72C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} (-15) + 96C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} (-19) + 120C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} Etc...$

For i < 0, j > 0 and j > i, that's to say S > 0; here comes for M'_P :

	$1 + 8C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$5 + 32C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$9 + 56C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$13 + 80C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$17 + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
--	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----

• $P \in \mathcal{F}_{V}[11]$ avec P = 11 + k * 36

For i > 0, j < 0 and j > i, that's to say S < 0; here comes for M'_P :

	$0 + 20C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-4) + 44C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-8) + 68C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-12) + 92C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-16) + 116C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$ Etc
--	--------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	---

For i < 0, j > 0 and j > i, that's to say S > 0; here comes for M'_P :

$4 + 12C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = 8 + 36C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$12 + 60C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$16 + 84C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$20 + 108C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
---	---------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----

• $P \in \mathscr{F}_{V}[17]$ avec P = 17 + k * 36

For i > 0, j < 0 and j > i, that's to say S < 0; here comes for M'_P :

 $5 + 16C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[1 + 40C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \right] (-3) + 64C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[(-7) + 88C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \right] (-11) + 112C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \right] (-11) + 112C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = 100$

MAÏSSEU

For i < 0, j > 0 and j > i, that's to say S > 0; here comes for M'_{P} :

$9 + 16C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} 13 + 40C_{(1,i)} 13 + 40C_{(1,i$) $17 + 64C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$21 + 88C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$25 + 112C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
--	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----

• $P \in \mathscr{F}_{V}[23]$ avec P = 23 + k * 36

For i > 0, j < 0 and j > i, that's to say S < 0; here comes for M'_P :

$4 + 12C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$0 + 36C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-4) + 60C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-8) + 84C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-12) + 108C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc

For i < 0, j > 0 and j > i, that's to say S > 0; here comes for M'_P :

$8 + 20C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$12 + 44C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$16 + 68C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$20 + 92C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$24 + 116C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----

• $P \in \mathscr{F}_{V}[29]$ avec P = 29 + k * 36

For i > 0, j < 0 and j > i, that's to say S < 0; here comes for M'_P :

 $1 + 8C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[(-3) + 32C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \right] (-7) + 56C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[(-11) + 80C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[Etc... + 8C_{(2,i)} \right] (-15) + 104C_{(2,i)} + 104C_{(2,$

For i < 0, j > 0 and j > i, that's to say S > 0; here comes for M'_P :

4.2.2.2. For $P \in \mathcal{F}_{VII}$: P = 6N + 1 1; *i* and *j* have same sign, $\Pi > 0$

• $\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{VII}[1]$ avec P = 1 + k * 36

For $i \ge 0, j \ge 0$; that's to say $S \ge 0$, here comes for M'_P :

 $(-4)-20C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-8)-44C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-12)-68C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-16)-92C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-20)-116C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | Etc...$

For i < 0, j < 0; that's to say S < 0, here comes for M'_P :

1 200 + 00	0 110 1 00	10 (00 + 00	1(000 + 00	20 11(0 + 0.0	- E(
$4-20C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$8-44C_{(1i)} + 8C_{(2i)}$	$12-68C_{(1 i)} + 8C_{(2 i)}$	$16-92C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$20-116C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
(1,1) (2,1)	(1,1) (2,1)	(1,1) (2,1)	(1,1) (2,1)	(1,1) (2,1)	

• $P \in \mathscr{F}_{\text{VII}}[7]$ avec $P = 7 + k^* 36$

For $i \ge 0$, $j \ge 0$; that's to say $S \ge 0$, here comes for M'_P :

 $(-3)-24C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-7)-48C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-11)-72C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-15)-96C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | (-19)-120C_{(1,i)}+8C_{(2,i)} | Etc...$

For i < 0, j < 0; that's to say S < 0, here comes for M'_P :

	$5-16C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$9-40C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$13-64C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$17 - 88C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$21 - 112C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
--	------------------------------	------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----

• $P \in \mathcal{F}_{VII}$ [13] avec P = 13 + k * 36

For $i \ge 0$, $j \ge 0$; that's to say $S \ge 0$, here comes for M'_P :

For i < 0, j < 0; that's to say S < 0, here comes for M'_P :

$8-12C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \qquad 12-36C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \qquad 16-60C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \qquad 20-84C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \qquad 24-108C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \qquad \text{Etc.}$	c
--	---

• $P \in \mathcal{F}_{VII}$ [19] avec P = 19 + k * 36

For $i \ge 0$, $j \ge 0$; that's to say $S \ge 0$, here comes for M'_P :

	$5-32C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \left[1-56C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} \right]$	$(-3)-80C_{(1,i)}+8C_{(2,i)}$	$(-7)-104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$(-11)-128C_{(1,i)}+8C_{(2,i)}$	Etc
--	--	-------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	-----

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

250

For $i < 0, j < 0$); that's to say S	< 0, here	comes for M'_{p} :
	.,		

$13-8C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$17 - 32C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$21-56C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$25-80C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$29 - 104C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
D = 0 [25	1 - 2 - 2 - 1 + 2				

• $P \in \mathcal{F}_{VII}$ [25] avec P = 25 + k * 36

For i > 0, j > 0; that's to say S > 0, here comes for M'_P :

$12-30C_{(1,i)} + \delta C_{(2,i)} = \delta - 00C_{(1,i)} + \delta C_{(2,i)} = 4-\delta C_{(1,i)} + \delta C_{(2,i)} = 0 - 10\delta C_{(1,i)} + \delta C_{(2,i)} = (-4)-132C_{(1,i)} + \delta C_{(2,i)} = EU.$	$C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = 8 - 60C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = 4 - 84C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = 0 - 108C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = (-4) - 132C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = 10 - 108C_{(1,i)} = 10 - 108C_{(1,i)}$	$(-4)-132C_{(1,i)}+8C_{(2,i)}$	$0-108C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$4-84C_{(1,i)}+8C_{(2,i)}$	$8-60C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$12-36C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$
--	--	--------------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------	-------------------------------

For i < 0, j < 0; that's to say S < 0, here comes for M'_{P} :

$24-28C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$28-52C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$32-76C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$36-100C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$40-124C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----

• $P \in \mathcal{F}_{VII}[31]$ avec P = 31 + k * 36

For i > 0, j > 0; that's to say S > 0, here comes for M'_P :

$21 - 40C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$17-64C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$13-88C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$9-112C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$5-136C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
---------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-----

For i < 0, j < 0; that's to say S < 0, here comes for M'_P :

$29-0C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)} = 33-24C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$37-48C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$41 - 72C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	$45-96C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	Etc
--	-------------------------------	---------------------------------	-------------------------------	-----

4.2.3. The co-second indice $M_{P}^{"}$

 M'_{P} , co-first indice of P, is composed with two elements, one of them is the sum of binomial coefficients.

We will call ψ_M the first part and C_M the second part. It comes:

$$M'_P = \Psi_M + C_M$$

example for \mathcal{F}_{V} [11], with *S* < 0:

• for u = 1, it comes: $M'_{p} = 0 + 20C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$, so $\Psi = 0;$

• for u = 2 it comes: $M'_P = (-4) + 44C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$, so $\psi = -4$;

• for u = 3, it comes: $M'_{P} = (-8) + 68C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$, so $\psi = -8$;

• for u = 4, it comes: $M'_P = (-12) + 92C_{(1,i)} +$ $8C_{(2,i)}$, so $\psi = -12$;

• for u = 5, it comes: $M'_P = (-16) + 116C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$, so $\psi = -16$.

		i = 1	<i>i</i> = 2	<i>i</i> = 3	<i>i</i> = 4	i = 5
u = 1	$M'_P = 0 + 20C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	20	48	84	128	180
<i>u</i> = 2	$M'_P = (-4) + 44C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	40	92	152	220	296
<i>u</i> = 3	$M'_P = (-8) + 68C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	60	136	220	312	412
<i>u</i> = 4	$M'_P = (-12) + 92C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	80	180	288	404	528
<i>u</i> = 5	$M'_P = (-16) + 116C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$	100	224	356	496	644
	+					
		u = 1	u = 2	<i>u</i> = 3	u = 4	u = 1
	III = 16 C + 72 C	16	10.4	261	106	000

 $= \Lambda$

$-(-10) + 110C_{(1,i)} + 3C_{(2,i)}$., .		P∈
+						P∈
	u = 1	u = 2	u = 3	<i>u</i> = 4	u = 5	1 2
$16 C_{(1)} + 72 C_{(2)}$	16	104	264	496	800	P∈

Example:

for $P = 2783 \in \mathcal{F}_{V}$ [11] with $N_{2783} = 464$; $M'_{2783} =$ 312, here is

$$\Delta = 264 + 312 = 24^2$$

 M_P could also be described as a function of indice u. For example with \mathcal{F}_{V} [11], it comes

$$M'_{P} = (-4)(u-1) + 4(6u-1)C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}.$$

We will call $M_{P}^{"}$, co-second indice:

$$M_P'' = M_P' - \psi_M.$$

By first, here comes the table of coefficients of
$$\psi_M$$
:

	u = 1	u = 2	<i>u</i> = 3	<i>u</i> = 4	u = 5	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[-1] \mathbf{S} \leq 0$:	(-4)	(-8)	(-12)	(-16)	(-20)	Etc
$\mathbf{P}\in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}\left[-1\right]\mathbf{S}\geq 0$	0	4	8	12	16	Etc
$\mathbf{P}\in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[5] \ \mathbf{S} < 0:$	(-3)	(-7)	(-11)	(-15)	(-19)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[5] \; \mathbf{S} \geq 0$	1	5	9	13	17	Etc
$\mathbf{P}\in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[11]\;\mathbf{S}<0\text{:}$	0	(-4)	(-8)	(-12)	(-16)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[11] \mathbf{S} \geq 0$	4	8	12	16	20	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[17] \mathbf{S} \leq 0$	5	1	(-3)	(-7)	(-11)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[17] \; \mathbf{S} \geq 0$	9	13	17	21	25	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[23] \mathbf{S} \leq 0$	4	0	(-4)	(-8)	(-12)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[23] \; \mathbf{S} \geq 0$	8	12	16	20	24	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[29] \ \mathbf{S} \leq 0$	1	(-3)	(-7)	(-11)	(-15)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathbf{V}}[29] \; \mathbf{S} \geq 0$	5	9	13	17	21	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{VII}[[1]] \mathbf{S} > 0$	(-4)	(-8)	(-12)	(-16)	(-20)	Etc

$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{VII}[1] \mathbf{S} \leq 0$	4	8	12	16	20	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathrm{VII}}\left[7\right] \mathbf{S} > 0$	(-3)	(-7)	(-11)	(-15)	(-19)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathrm{VII}}\left[7\right] \mathbf{S} < 0$	5	9	13	17	21	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathrm{VII}} [13] \mathbf{S} > 0$	0	(-4)	(-8)	(-12)	(-16)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{VII}$ [13] S < 0	8	12	16	20	24	Etc
$P \in \mathcal{F}_{VII}$ [19] S > 0	5	1	(-3)	(-7)	(-11)	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{VII}$ [19] S < 0	13	17	21	25	29	Etc
$P \in \mathcal{F}_{VII}$ [25] S > 0	12	8	4	0	(-4)	Etc
$P \in \mathcal{F}_{VII}$ [25] S < 0	24	28	32	36	40	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathrm{VII}}[31] \; \mathbf{S} \ge 0$	21	17	13	9	5	Etc
$\mathbf{P} \in \mathcal{F}_{\mathrm{VII}}[31] \mathbf{S} < 0$	29	33	37	41	45	Etc

4.3. Calculation of III_u

(let remind about III_{u} : its definition via $\Delta = M'_{P} + III$)

Ш	u = 1;	u = 2;	u = 3;	u = 4;	u = 5;	u = 6;
щ	S > 0	S > 0	S > 0	S > 0	S > 0	S > 0
J.	1 * 40 +	2*40+	3 * 40 +	4 * 40 +	5 * 40 +	6 * 40 +
υ _γ	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[-1]	40	152	336	592	920	1320
\mathcal{F}_{v}	1 * 44 +	2*44+	3 * 44 +	4 * 44 +	5*44+	6*44+
- v	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[5]	44	160	348	608	940	1344
Ŧ	1 * 56 +	2 * 56 +	3 * 56 +	4 * 56 +	5 * 56 +	6 * 56 +
U V	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[11]	56	184	384	656	1000	1416
\mathcal{F}_{v}	1*68+	2*68+	3*68+	4 * 68 +	5 * 68 +	6 * 68 +
- v	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[1/]	68	208	420	704	1060	1488
Ŧ	1 * 8 +	2 * 8 +	3 * 8 +	4 * 8 +	5 * 8 +	6 * 8 +
- v	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[23]						
	8	88	240	464	760	1128
Ŧ	$\frac{8}{1*20+}$	$\frac{88}{2*20+}$	$\frac{240}{3*20+}$	$\frac{464}{4*20+}$	$760 \\ 5*20+$	$\frac{1128}{6*20+}$
F V	8 1*20+ 0*72	88 2*20+ 1*72	$ \begin{array}{r} 240 \\ 3 * 20 + \\ 3 * 72 \end{array} $		760 5 * 20 + 10 * 72	1128 6 * 20 + 15 * 72
F _ν [29]		88 2*20+ 1*72 112	$ \begin{array}{r} 240 \\ 3*20+ \\ 3*72 \\ 276 \end{array} $		$ \begin{array}{r} 760 \\ 5 * 20 + \\ 10 * 72 \\ 820 \end{array} $	$ \begin{array}{r} 1128 \\ 6 * 20 + \\ 15 * 72 \\ 1200 \end{array} $
F _ν [29]	8 1*20+ 0*72 20	88 2*20+ 1*72 112	$ \begin{array}{r} 240 \\ 3*20 + \\ 3*72 \\ 276 \end{array} $	464 4 * 20 + 6 * 72 512	760 5 * 20 + 10 * 72 820	$ \begin{array}{r} 1128 \\ 6 * 20 + \\ 15 * 72 \\ 1200 \end{array} $
F _ν [29]	$ \frac{8}{1 * 20 + 0 * 72} \\ 20 \\ u = 1; $	$ \begin{array}{r} 88 \\ 2 * 20 + \\ 1 * 72 \\ 112 \\ \qquad \qquad$	$ \begin{array}{r} 240 \\ 3 * 20 + \\ 3 * 72 \\ 276 \\ \overline{} \\ u = 3; \end{array} $	$ \frac{464}{4*20+} \frac{6*72}{512} $ $ u = 4; $	$ \begin{array}{r} 760 \\ 5 * 20 + \\ 10 * 72 \\ 820 \\ \end{array} $ $ u = 5; $	$ \begin{array}{r} 1128\\ 6*20+\\ 15*72\\ 1200\\ \hline u=6; \end{array} $
Э _V [29] Щ	$ \frac{8}{1 * 20 + 0 * 72} \\ 20 \\ u = 1; \\ S < 0 $	$ \begin{array}{r} 88 \\ 2 * 20 + \\ 1 * 72 \\ 112 \\ u = 2; \\ S < 0 \end{array} $	$ \begin{array}{r} 240 \\ 3*20+ \\ 3*72 \\ 276 \\ \hline u=3; \\ S<0 \end{array} $	$ \begin{array}{r} 464 \\ 4*20+ \\ 6*72 \\ 512 \\ \hline u = 4; \\ S < 0 \end{array} $	$ \begin{array}{r} 760 \\ 5 * 20 + \\ 10 * 72 \\ 820 \\ \hline u = 5; \\ S < 0 \end{array} $	$ \begin{array}{r} 1128 \\ \hline 6 * 20 + \\ 15 * 72 \\ \overline{1200} \\ \end{array} $ $ \begin{array}{r} u = 6; \\ S < 0 \end{array} $
ℱ _V [29] Щ	$ \begin{array}{r} 8 \\ 1 * 20 + \\ 0 * 72 \\ 20 \\ \hline u = 1; \\ S < 0 \\ 1 * 32 + \end{array} $	$ \begin{array}{r} 88 \\ 2 * 20 + \\ 1 * 72 \\ 112 \\ \hline u = 2; \\ S < 0 \\ 2 * 32 + \end{array} $	$240 \\ 3*20+ \\ 3*72 \\ 276 \\ u = 3; \\ S < 0 \\ 3*32+ \\ 3 + 32 \\ 3 +$	$ \begin{array}{r} 464 \\ 4*20+ \\ 6*72 \\ 512 \\ \hline u = 4; \\ S < 0 \\ 4*32 + \end{array} $	$ \begin{array}{r} 760 \\ 5 * 20 + \\ 10 * 72 \\ 820 \\ \end{array} $ $ \begin{array}{r} u = 5; \\ S < 0 \\ 5 * 32 + \\ \end{array} $	$ \begin{array}{r} 1128\\ 6*20+\\ 15*72\\ 1200\\ \hline u=6;\\ S<0\\ 6*32+\\ \end{array} $
<i>У</i> _V [29] Щ <i>У</i> _V	$ \begin{array}{r} 8 \\ 1 * 20 + \\ 0 * 72 \\ 20 \\ \hline u = 1; \\ S < 0 \\ 1 * 32 + \\ 0 * 72 \\ \end{array} $	$ \begin{array}{r} 88 \\ 2 * 20 + \\ 1 * 72 \\ 112 \\ \hline u = 2; \\ S < 0 \\ 2 * 32 + \\ 1 * 72 \\ \end{array} $	240 3*20+ 3*72 276	$ \begin{array}{r} 464 \\ 4*20+ \\ 6*72 \\ 512 \\ \hline u = 4; \\ S < 0 \\ 4*32+ \\ 6*72 \\ \hline 4*72 \\ 4 \\ 6*72 \end{array} $	$ \begin{array}{r} 760 \\ 5 * 20 + \\ 10 * 72 \\ 820 \\ \hline u = 5; \\ S < 0 \\ 5 * 32 + \\ 10 * 72 \end{array} $	$ \begin{array}{r} 1128\\6*20+\\15*72\\1200\\\hline\\ u=6;\\S<0\\\hline\\6*32+\\15*72\\\hline\end{array} $

1*28 + 2*28 + 3*28 + 4*28 + 5*28 + 6*28 +

6 * 72

544

3 * 72

300

 \mathcal{F}_{V}

[5]

0 * 72

28

1 * 72

128

	1 * 16 +	2 * 16 +	3 * 16 +	4 * 16 +	5 * 16 +	6 * 16 +
J [*] V	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[11]	16	104	264	496	800	1176
F	1 * 4 +	2*4+	3 * 4 +	4 * 4 +	5 * 4 +	6 * 4 +
[17]	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[1,]	4	80	228	448	740	1104
\mathcal{F}_{v}	1*64+	2*64+	3*64+	4*64+	5*64+	6*64+
[23]	0*72	1*/2	3*72	6*/2	10 * 72	15 * 72
. ,	64	200	408	688	1040	1464
\mathcal{F}_{V}	1 * 52 + 0 * 72	2*52+ 1*72	3*52+ 2*72	4 * 52 + 6 * 72	5 * 52 + 10 * 72	6 * 52 + 15 * 72
[29]	52	176	372	640	080	13 72
	52	170	372	040	980	1392
Щ	u = 1; $S \ge 0$	u = 2; $S \ge 0$	u = 3; $S \ge 0$	u = 4; $S \ge 0$	u = 5; $S \ge 0$	u = 0; $S \ge 0$
	3 > 0 1 * 40 +	3 > 0 2 * 40 +	$3 \times 40 +$	3 > 0 4 * 40 +	5 > 0 5 * 40 +	$\frac{5}{6*40+}$
$\mathcal{F}_{\mathrm{VII}}$	1 1 0 Γ	∠ +∪ Γ 1 * 70	2 * 70	- +U -		15 * 70
[1]	0 * /2 40	1 * 72	3 * 12 220	0 * /2 502	10 * 72	13 * 72
	40	152	336	392 4*52 -	920	1320
\mathcal{F}_{VII}	1*52+	2*52+	3*52+	4*52+	5*52+	6*52+
[7]	0 * 72	1*72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[,]	52	176	372	640	980	1392
FvII	1*64+	2*64+	3*64+	4*64+	5*64+	6*64+
[13]	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[15]	64	200	408	688	1040	1464
F.	1 * 76 +	2 * 76 +	3 * 76 +	4 * 76 +	5 * 76 +	6 * 76 +
0 VII [10]	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[19]	76	224	444	736	1100	1536
5	1 * 88 +	2 * 88 +	3 * 88 +	4 * 88 +	5 * 88 +	6 * 88 +
	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[25]	88	248	480	784	1160	1608
J.	1 * 100	2 * 100	3 * 100	4 * 100	5*100+	6*100+
5 VII	+ 0 * 72	+ 1 * 72	+ 3 * 72	+ 6 * 72	10 * 72	15 * 72
[31]	100	272	516	832	1220	1680
	u = 1;	u = 2;	u = 3;	u = 4;	u = 5;	u = 6;
Щ	<i>S</i> < 0	<i>S</i> < 0	<i>S</i> < 0	<i>S</i> < 0	S < 0	S < 0
$\sigma_{\rm b}$	1 * 32 +	2*32+	3 * 32 +	4 * 32 +	5*32+	6 * 32 +
F _{VII}	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[1]	32	136	312	560	880	1272
፲	1 * 20 +	2*20+	3*20+	4 * 20 +	5*20+	6 * 20 +
$\sigma_{\rm VII}$	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[/]	20	112	276	512	820	1200
Ţ	1 * 8 +	2 * 8 +	3 * 8 +	4 * 8 +	5 * 8 +	6 * 8 +
5 VII	0 * 72	1 * 72	3 * 72	6 * 72	10 * 72	15 * 72
[13]	8	88	240	464	760	1128
Ţ	1*(-4)	2*(-4)	3*(-4)	4*(-4)	5*(-4)	6*(-4)
U VII	+ 0 * 72	+ 1 * 72	+ 3 * 72	+ 6 * 72	+ 10 * 72	+ 15 * 72
[19]	-4	64	204	416	700	1056

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

10 * 72 15 * 72

1248

860

252

F _{VII}	1*(-16) +0*72	2*(-16) +1*72	3*(-16) + 3 * 72	4*(-16) +6*72	5*(-16) + 10*72	6*(-16) + 15*72
[25]	-16	40	168	368	640	984
F _{VII}	1*(-28) + 0*72	2*(-28) +1*72	3*(-28) + 3 * 72	4*(-28) +6*72	5*(-28) + 10*72	6*(-28) + 15 * 72
[31]	-28	16	132	320	580	912

4.4. Calculation of Ц

Indice u could be also defined as the iteration rank (see 4.2.1).

Here comes:

II = i + j.

Example for
$$F_V$$
 [11], $S < 0$
 $\mu = (-2) + 6u$.

Rank $= u$	0	1	2	3	4	Etc
i+j	0	4	10	16	22	Etc

4.5. Prime condition for P

If we refer to Δ calculation process (§ 4.2.1.), it comes:

$$\Delta^2 = III + M = II^2 + M_P^{"}.$$

Which give the prime condition for *P*:

• *P* is a composite number if M'_P is egal to a difference between two square numbers (*which, of course, must not be consecutive odd numbers*):

$$M_P'' = \Delta^2 - H^2,$$

that could be looked as a premise of the Fermat's Last Theorem.

• *P* is a prime number if M'_P is not egal to a difference between two square numbers.

Regarding above example:

for $P = 2783 \in \mathcal{F}_{V}$ [11] with $N_{2783} = 464$; $M'_{2783} = 312$, u = 3, so $\psi_{2783} = (-8)$, it comes:

$$M''_{2783} = M'_{2783} - (-8) = 320$$

 $\Delta = 264 + 312 = 16^2 + 320 = 24^2$:

Generalization:

1° Due to the remainder, R, in the division of P with 36 as divisor, we know F, the P sub-family

$$P = 36 * k + R$$
.

For F_V , $R = \{(-1) \text{ ou } 35, 5, 11, 17, 23, 29, 35\}$. For F_{VII} , $R = \{1, 7, 13, 19, 25, 31\}$.

It comes M'_P , then ψ , and so M''_P , III et II. Example: for $F_V[11]$, S < 0, the formula giving M'_P , is:

$$M'_{P} = (-4)(u-1) + 4(6u-1)C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)},$$

and

$$M_P'' = 4(6u - 1)C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$$

which is egal to the difference between two square numbers, and, so to the sum of consecutive odd numbers. As \underline{U} is the last element of this sum, we could check – or not –.

$$(2II + 1) + (2II + 3) + (2II + 5) + ... + (2II' - 1),$$

 $M''_{P} = \Delta^{2} - II^{2}.$

 \rightarrow If yes, *P* is a composite number;

 \rightarrow if not, *P* is a prime number.

P = 4439, P = 11 + k * 36, it comes $P \in \mathcal{F}_{V}[11]; k = 123.$ $N_{4439} = 740;$

, 4439

 $M'_{4439} = [(2 * (N_{4439} - 2)/3] + 4 = 496.$

 M'_{4439} get the general form: (-16) +116 $C_{(1,i)}$ +8 $C_{(2,i)}$. It comes i_{4439} = 4 and u_{4439} = 5.

$$M''_{4439} = M'_{4439} + \psi = 496 + 16 = 512,$$

$$MI = 5 * 16 + 10 * 72 = 800$$

w = (-16).

and

$$II = 28,$$

 $M''_{4439} = 57 + 59 + 61 + 63 + 65 + 67 + 69 + 71 = 512$
 $= 36^2 - 28^2.$

 P_{4439} is composite number.

$$\Delta = III + M'_{4439} = II^2 + M''_{4439} = 800 + 496 = 28^2 + 512$$

= 1296 = 36²,
 $i = 4$ and $j = (-32)$,
 $P = 23 * 193$.

P = 2363; $P = 23 + k * 36, \text{ it comes } P \in \mathcal{F}_{V}[\mathbf{23}] \text{ et } k = 65.$ $N_{2363} = 394;$ $M'_{2363} = [(2 * (N_{2363} - 4)/3] + 8 = 268.$ $M'_{2363} \text{ get the general form: } (-8) + 84C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}.$ It comes $\mathbf{i}_{2363} = 3$ and $\mathbf{u}_{2363} = 3.$ So:

$$\psi = (-8),$$

$$M''_{2363} = M'_{2363} + \psi = 268 + 8 = 276$$
$$III = 3 * 64 + 3 * 72 = 408$$

and

$$H = 20,$$

$$M''_{2363} = 41 + 43 + 45 + 47 + 49 + 51 = 276 = 26^2 - 20^2$$

 P_{2363} is a composite number.

$$\mathcal{U}' = 26,$$

$$\Delta = \mathcal{U} + M'_{2363} = \mathcal{U}^2 + M''_{2363} = 408 + 268 = 20^2 + 276$$

$$= 676 = 26^2,$$

$$i = 3 \text{ and } j = (-23),$$

$$P = 17 * 139.$$

5.3. P = 1969; P = 25 + k * 36, it comes $P \in \mathcal{F}_{VII}$ [25] et k = 54. $N_{1969} = 328;$ $M'_{1969} = 16 - (2 * (N_{2363} - 4)/3] = (-200).$ M'_{1969} get the general form: $40 - 124C_{(1,i)} + 8C_{(2,i)}$. It comes $|i_{1969}| = 2$ and $u_{1969} = 5$. So:

$$\psi = 40$$
,

$$M''_{1969} = M'_{1969} + \psi = (-200) + (-40) = (-240),$$

$$III = 6 * (-16) + 15 * 72 = 984$$

and

D 1400

$$II = 28,$$

 $M''_{1969} = 41 + 43 + 45 + 47 + 49 + 51 = 276 = 32^2 - 28^2.$

P is a composite number. II' = 32.

$$\Delta = III + M'_{1969} = II^2 + M''_{1969} = 984 + (-200) = 32^2 - 240 = 676 = 28^2,$$

 $i = (-2) \text{ et } j = (-30),$
 $P = 11 * 179.$

5.4.

$$P = 1493;$$

$$P = 17 + k * 36, \text{ it comes } P \in \mathcal{F}_{V}[17] \text{ et } k = 41.$$

$$N_{1493} = 249;$$

$$M'_{1493} = 2(N-3)/3) + 9 = 173.$$

If *P* would be a composite number, M'_{1493} must get one of the below general form:

For i > 0, j < 0 et j > i, which means S < 0, it would come for M'_{1493} :

$$5 + 16C(1,i) + 8C(2,i) | 1 + 40C(1,i) + 8C(2,i) | (-3) + 64C(1,i) + 8C(2,i) | (-7) + 88C(1,i) + 8C(2,i) | (-11) + 112C(1,i) + 8C(2,i) | Etc...$$

aso...

Or, for i < 0, j > 0 et j > i, which means S > 0, it would come for M'_P :

9+16C(1,i) + 8C(2,i) 13 + 40C(1,i) + 8C(2,i)	17 + 64C(1,i) + 8C(2,i)	21 + 88C(1,i) + 8C(2,i)	25 + 112C(1,i) + 8C(2,i)	Etc
--	-------------------------	-------------------------	--------------------------	-----

aso ...

There are no (i, u) pair which could fit with above statement.

P = 1493 is prime.

Due to § 2 and following

$$(i, j) = (3 \pm \sqrt{173})/2$$

it comes:

$$\begin{split} 6|(i*j)| + (i+j) = & 249 = N_{1493}, \\ X = 6*i - 1 = 6*(3 + \sqrt{173})/2 - 1, \\ Y = 6*j + 1 = 6*(3 - \sqrt{173})/2 + 1, \\ X*Y = \{[6*(3 + \sqrt{173})/2] - 1\}*\{[6*(3 - \sqrt{173})/2] + 1\} = & 1493. \end{split}$$

CONCLUSION

Prime rule for integers. An integer is prime when its co-second indice is not egal to the difference of two square numbers, X^2 and Y^2 , $\forall X$ et $Y \in \mathbb{N}^*$, X or Ynot odd consecutive numbers, and $X, Y \neq 1$. P is prime if: $M_P^{"} \neq Y^2 - X^2$. Also, regarding Stirling's formula:

$$M_P'' = C_{(1,Y)} - C_{(1,X)} + 2[C_{(2,Y)} - C_{(2,X)}].$$

REFERENCES

1. André Maïsseu, Benoît Maïsseu. Вестник НИЯУ МИФИ. 2019. Т. 8. № 2. С. 175–178.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

254

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 245-255

Базовые условия для простых целых чисел

Андре Мэсё#

Университет Париж 1-Сорбонна, Париж, 75231, Франция [#]e-mail: andre.maisseu@wanadoo.fr Поступила в редакцию 08.05.2020 г. После доработки 25.05.2020 г. Принята к публикации 09.06.2020 г.

В этой статье мы предлагаем разбить натуральные числа P на два коэффициента i и j, сообщаемые их нижнему индексу N, который определяется уравнением P = 6 $N \pm 1$; i и j определены другим уравнением, $N = 6 * |i| * |j| \pm (i \pm j)$. N является натуральным целым числом, но i и j не обязательно являются натуральными целыми числами. Они могут быть иррациональными. Используя такой необычный подход теории чисел, мы предлагаем простое соотношение между двумя квадратами чисел в качестве необходимого условия для любого простого числа. Мы предполагаем, что такие отношения можно рассматривать как следствие последней теоремы Ферма.

Ключевые слова: натуральное целое число, простые числа, составное число, рациональное число, иррациональное число, теорема Ферма

DOI: 10.1134/S2304487X20030050

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. André Maïsseu, Benoît Maïsseu. Вестник НИЯУ МИФИ. 2019. Т. 8. № 2. С. 175–178.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, с. 256–261

> _ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА _____ И ИНФОРМАТИКА

УДК 621.039

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

© 2020 г. В. В. Бочкарев^{1,2}, Б. Д. Бриллиантов^{1,2}, А. В. Крянев^{1,3,*}, А. А. Бацулин^{1,2}, С. Г. Климанов¹, О. Ю. Литвиненко^{1,2}, Д. В. Мамай^{1,2}, Д. Е. Слива¹, Д. С. Смирнов¹, П. А. Стряпушкин^{1,2}, В. И. Терешкин^{1,2}, Д. Т. Ханбикова²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия ² НТЦ ядерной и радиационной безопасности, Москва, 107140, Россия ³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

> *e-mail: avkryanev@mephi.ru Поступила в редакцию 28.05.2020 г. После доработки 01.07.2020 г. Принята к публикации 07.07.2020 г.

В статье рассмотрена структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. В предлагаемой структуре предусмотрен анализ различных вариантов вывода из эксплуатации рассматриваемого объекта использования атомной энергии и выбор оптимального варианта вывода его из эксплуатации. В системе учитываются неопределенности в исходных данных, в том числе, неопределенности, которые описываются с помощью нечетких величин. Варианты вывода из эксплуатации оцениваются по нескольким частным показателям и сводятся к трем агрегированным показателям.

Ключевые слова: система, принятие решений, вывод из эксплуатации, объекты использования атомной энергии, оптимальный вариант, показатели, неопределенность

DOI: 10.1134/S2304487X20030025

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача создания системы поддержки принятия оптимальных решений (СППОР) при выводе из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) является актуальной для организаций и подразделений управления использованием атомной энергией, в связи с деятельностью по разработке и реализации процесса ВЭ ОИАЭ, обоснованию безопасности и экономической целесообразности всех этапов по реализации ВЭ ОИАЭ [1-6]. Одной из актуальных частных задач ВЭ ОИАЭ является сравнение и выбор варианта ВЭ рассматриваемого ОИАЭ. Задача выбора варианта реализации ВЭ ОИАЭ является многокритериальной задачей, осложненной: неопределенными значениями оценок объемов производимых работ; неопределенностью используемых оценок экспертов: неопределенностью оценок последствий реализации того или иного варианта реализации ВЭ ОИАЭ; необходимостью учета возможных рисков и разного характера неопределенностей; многовариантными подходами к обращению с РАО, образующимися при демонтаже и дезактивации основного технологического оборудования и инженерной инфраструктуры (оборудование, помещения, вентиляция, техническая канализация, транспортеры, промышленные площадки и т.д.).

Задача реализации выбранного варианта ВЭ является актуальной и для эксплуатирующих организаций, а также для проектных организаций на всех стадиях полного жизненного цикла ОИ-АЭ [7–14]. СППОР и заложенные в ней базы данных и расчетные компьютерные программы поддержки принятия оптимальных решений при управлении выводом из эксплуатации ОИАЭ – одна из важных дополняющих частей информационной системы ВЭ ОИАЭ.

2. СТРУКТУРА СППОР

Числовые значения показателей состояния ОИАЭ, на основе которых рассчитывается процесс ВЭ ОИАЭ, известны с неопределенностью, порождаемой неопределенностью исходных данных в расчетных моделях и экспертными оценками тех показателей, значения которых не могут быть рассчитаны, а оцениваются экспертами. Поэтому, для математического описания неопределенности в значениях входных данных и разработки схемы и основанного на ней алгоритма оценки состояния ОИАЭ необходимо использовать, как аппарат теории вероятностей, когда входные данные получены расчетным путем, так и аппарат нечетких множеств, когда входные данные получены путем экспертных оценок [15–18]. В таком случае возникает дополнительная проблема оптимального объединения оценок показателей, при различном виде описания неопределенности. В рамках разработки методики и алгоритма оценки вариантов ВЭ ОИАЭ разработан и использован метод оптимального объединения оценок показателей.

Исходными данными состояния ВЭ ОИАЭ являются:

 физические объемы конструкций и элементов, подлежащих дезактивации, демонтажу, упаковке, транспортировке, захоронению РАО (размеры – объем, площадь, длина и т.д., вес, вид материала и его состояние);

2) объемы (количество) радиоактивных веществ и их тип (твердые, жидкие);

 интенсивность радиоактивного излучения и его тип (γ-излучение, α, β-частицы, периоды полураспада);

4) Набор технологических операций дезактивации, демонтажа, упаковки, транспортировки, захоронения с указанием стоимости работ, длительности и уровня надежности обеспечения ЯРБ. Причем даны характеристики неопределенности числовых показателей (стоимости, длительности, либо как случайных величин — нормальное или β -распределение, либо как нечетких величин равномерные, треугольные, или трапецеидальные). Уровень надежности может задаваться качественно (высоко надежная, надежная, умеренно надежная, слабо надежная, опасная). Тогда каждому уровню надежности присваивается числовое значение, например, 5, 4, 3, 1, 0 для каждого уровня соответственно.

В статье предложена структура СППОР по ВЭ ОИАЭ. В предлагаемой структуре предусмотрено наличие схемы анализа различных вариантов ВЭ ОИАЭ, основанной на многокритериальном подходе. В частности, наряду с обычными выводами из эксплуатации (до уровня "зеленой лужайки" и захоронением радиоактивных отходов на месте) объекта использования атомной энергии в модели предусмотрено их оптимальное сочетание с учетом экономической эффективности и обеспечения радиационной безопасности.

В СППОР учитываются неопределенности в исходных данных, в том числе данных, определяемых экспертно, неопределенность которых описывается с помощью нечетких множеств.

Расчетная часть СППОР оценивает выводимый объект по большому числу показателей, сводя их к нескольким агрегированным критериям, из которых наиболее значимыми являются сводный показатель потенциальной опасности и сводный финансовый показатель с учетом уровней их неопределенности. Расчетная часть СППОР обеспечивает свертку показателей по каждой группе и дает итоговую оценку варианта вывода из эксплуатации, используя многокритериальный подход и степень неопределенности каждого частного показателя. Тем самым СППОР позволит получать исходные показатели реализации вариантов ВЭ ОИАЭ с помощью предварительных расчетов или с помощью экспертных оценок с учетом неопределенности их значений. Схема позволяет выбрать оптимальный вариант ВЭ ОИАЭ, соответствующий оптимальному соотношению критериев.

Ниже на рис. 1 приведена бло-схема структуры СППОР по ВЭ ОИАЭ.

В СППОР заложен принцип универсальности, реализуемый в наличии в СППОР блоков базы данных типовых: элементов выводимых из эксплуатации ОИАЭ различных категорий (блоков энергетических ядерных реакторов различных типов, исследовательских и промышленных ядерных реакторов, пунктов хранения радиоактивных отходов (РАО) и др.); технологических операций по ВЭ ОИАЭ; ресурсов, необходимых для реализации типовых технологических операций. Кроме этого, в базу данных СППОР включены блок нормативных требований обеспечения ЯРБ и блок типовых рисков в процессе ВЭ ОИАЭ.

Варианты ВЭ отличаются выбором разных технологических операций по дезактивации, демонтажу, упаковке, транспортировке, захоронению РАЭ и РАО.

Для реализации программы сравнения вариантов ВЭ ОИАЭ предполагается, что предварительно для рассчитываемых вариантов сравнения выбраны допустимые наборы технологических операций дезактивации, демонтажа, упаковки, транспортировки, захоронения, конкретные для каждого варианта ВЭ. Эти наборы технологических операций имеют разные стоимости работ, разные длительности работ, разные уровни надежности обеспечения безопасности и, прежде всего, ЯРБ, и для различных вариантов ВЭ подбирается определенный набор технологических операций, соответствующих рассматриваемому варианту.

Для определения варианта вывода из эксплуатации, как правило, используется многофакторный анализ показателей, которые влияют на выбор того или иного варианта. Следовательно, задачу по выбору и обоснованию варианта вывода из эксплуатации можно представить как задачу поиска оптимального решения в многокритериальном пространстве и условно разбить на следующие этапы:

1. Определение показателей, которые необходимо учитывать, и которые влияют на выбор того или иного варианта вывода из эксплуатации.



Рис. 1. Блок-схема программного комплекса СППОР по ВЭ ОИАЭ.

2. Проведение многофакторного анализа, решение задачи оптимизации.

3. Сравнительная оценка вариантов вывода из эксплуатации по полученным результатам многофакторного анализа.

4. Принятие обоснованного решения о выборе варианта ВЭ [19].

В представленной схеме предлагается следующий подход к выбору и обоснованию варианта ВЭ ОИАЭ: при сопоставлении рассматриваемых возможных вариантов ВЭ рекомендуется опираться на методы многофакторного выбора на конечном множестве альтернатив (вариантов выбора технологических операций ВЭ ОИАЭ), с учетом следующего минимального набора показателей:

 количественный показатель медико-социального обоснования соотношения польза—вред в соответствии с принципом обоснования;

 величины расходов, связанных с реализацией каждого из рассматриваемых вариантов ВЭ.

На этапе идентификация вариантов ВЭ ОИАЭ для каждого варианта ВЭ ОИАЭ определяются количественные значения каждого показателя.

Ниже приведен перечень показателей, характеризующих сравниваемые варианты ВЭ: 1. Финансово-экономический показатель (стоимость ВЭ).

2. Длительность ВЭ.

3. Три показателя обеспечения радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды.

Все показатели представляются неопределенными числовыми значениями и, следовательно, характеризуются средним ожидаемым значением и дисперсией (если неопределенность числовых значений описывается нечеткими числами (Fuzzy Sets), то они переводятся в эквивалентные случайные величины и для них подсчитываются дисперсии). Дисперсии (СКО) показателей являются также дополнительными показателями, характеризующими степень неопределенности средних ожидаемых значений. Поэтому в настояшем представлении каждый вариант ВЭ характеризуется в общем случае 10 показателями -5 средними ожидаемыми значениями показателей и 5 их дисперсиями, причем только три из десяти показателей подлежат максимизации средние ожидаемые значения третьего-пятого показателей, остальные показатели подлежат минимизации. Набор показателей может быть расширен с учетом конкретных характеристик ОИАЭ и места его расположения.

Примерный перечень дополнительных показателей, рекомендуемых для оценки при рассмотрении различных вариантов ВЭ и их комбинаций, представлен ниже. Помимо основных вышеперечисленных показателей можно и нужно учитывать ряд дополнительных показателей, которые в совокупности могут повлиять на принятие решения о выборе варианта ВЭ, а также повысить точность проводимых оценок и расчетов:

1. Возможность обращения (извлечения, переработки, кондиционирования, транспортирования к существующему пункту захоронения и захоронение) с накопленными и эксплуатационными отходами.

2. Техническая возможность демонтажа основного и вспомогательного оборудования, зданий и сооружений.

3. Возможность повторного использования основного и вспомогательного оборудования, зданий и сооружений.

4. Возможность удаления загрязненной почвы.

5. Необходимость наличия централизованных пунктов окончательной изоляции РАО.

6. Возможность переработки и захоронения образующихся нерадиоактивных отходов.

7. Полнота соответствия требованиям ядерной, радиационной и промышленной безопасности.

8. Наличие соответствующих ресурсов (финансовых, персонала и т.д.).

9. Наличие соответствующего нормативного правового обеспечения.

10. Социальные/политические факторы.

11. Возможность повторного использования территории ОИАЭ (части территории ОИАЭ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена структура СППОР при ВЭ ОИАЭ. Одной из основных функций, выполняемых СППОР, является в рамках многокритериального подхода и неопределенности исходных данных, выбор оптимального варианта набора технологических операций по ВЭ ОИАЭ. Предлагается минимальный набор основных критериев, определяющих выбранные варианты. Подчеркивается, что возможен учет дополнительных показателей для оценки при рассмотрении различных вариантов ВЭ. Создаваемая в рамках проекта СППОР дает возможность выбирать оптимальные решения на основе всех основных показателей ВЭ рассматриваемого объекта, таких как: стоимость, длительность и показатели, определяющие радиационную безопасность (обеспечение максимально возможного уровня защищенности персонала и населения от радиационного воздействия, недопущение выбросов и сбросов РВ в окружающую среду в количествах, превышающих нормативы), оптимизируя эти показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Линге Ин.И., Абалкина И.Л., Ведерникова М.В., Бирюков Д.В., Иорданов А.С., Линге И.И., Ковальчук Д.В., Крючков Д.В., Уткин С.С., Алексахин Р.М., Хамаза А.А., Бочкарев В.В., Супатаева О.А., Кононов В.В., Тихоновский В.Л., Иванов О.П., Павленко В.И., Семенов С.Г., Чесноков А.В. Заключительный том трехтомной монографии "Проблемы ядерного наследия и пути их решения", посвященный завершающему этапу жизненного цикла объекта использования атомной энергии – выводу из эксплуатации. "Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации". Под общей редакцией академика РАН Л.А. Большова, Н.П. Лаверова, чл.-кор. РАН И.И. Линге. М.: 2015, 316 с.
- Абалкина И.Л., Бирюков Д.В., Ведерникова М.В., Дорогов В.И., Илюшкин А.И., Иорданов А.С., Ковальчук Д.В., Линге И.И., Ободинский А.Н., Савкин М.Н., Самойлов А.А., Абрамов А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Линге Ин. И., Курындина Л.А., Бочкарев В.В., Хамаза А.А., Шадилов А.Е., Шарафутдинов Р.Б., Ковальчук А.А., Каманин А.Н., Куликов А.А., Иванова О.И., Косова О.Е., Лавров К.Н., Старкова М.В., Барчуков В.Г., Кочеткова О.А. "Инвентаризация ядерно и радиационно опасных объектов. Ожидаемые результаты и перспективы их использования". Москва, препринт ИБРАЭ РАН, № IBRAE-2014-05. 2014. 39 с.
- 3. Абрамова А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Кудрявцев Е.Г., Большов Л.А., Линге И.И., Абалкина И.Л., Бирюков Д.В., Ведерникова М.В., Хамаза А.А., Шарафутдинов Р.Б., Бочкарев В.В. К вопросу оценки объема ядерного наследия в атомной промышленности и на иных объектах мирного использования атомной энергии в России. Ядерная и радиационная безопасность. 2014. № 3 (73). С. 1–11.
- 4. Тезисы доклада "Научно-методическое сопровождение мероприятий федеральной целевой программы "Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года" по подготовке к выводу и выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия и по обращению с особыми радиоактивными отходами" в обеспечение мероприятия "Разработка и практическое использование при выводе из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов новых высокоэффективных технологий". НТС ФБУ "НТЦ ЯРБ" от 17.11.2016 г.
- 5. Федеральная целевая программа "Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года".
- 6. International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, IAEA, 2012. 195 p.
- 7. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants. IAEA, 2016. 260 p.
- 8. Financing the Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA, 2016. 23 p.
- Емец П.Е., Ковалевич О.М., Крянев А.В., Шарафутдинов Р.Б. Математические модели расчета инвестиционной эффективности вывода из эксплуа-

тации ЯРОО. Препринт МИФИ 002-2007. М.: МИФИ, 2007. 27 с.

- Емец П.Е., Ковалевич О.М., Крянев А.В., Неретин В.А., Шарафутдинов Р.Б. Системный подход при финансировании мероприятий по выводу из эксплуатации ЯРОО, классифицируемых в зависимости от категории их ЯРО. Препринт МИФИ 005-2007. М.: МИФИ, 2007. 23 с.
- Емец П.Е., Крянев А.В. Методика оценки экономической эффективности вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов. Бюллетень по атомной энергии. 2008. № 11. С. 4–7.
- 12. *Емец П.Е., Крянев А.В.* Инвестиционная эффективность вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО). Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 1 (59). С. 10–19.
- 13. Бочкарев В.В., Крянев А.В., Ханбикова Д.Т. Ранжирование ядерно и радиационно-опасных объектов, эксплуатация которых прекращена. "Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем": материалы Всероссийской конференции

с международным участием, Москва, РУДН, 2014. С. 195–197.

- 14. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities. IAEA, 2017. 68 p.
- 15. Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных. М.: Физматлит, 2006.
- 16. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981.
- 17. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
- Семёнов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М.: URSS, 2015.
- РБ-153-18 "Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии". Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 декабря 2018 г. № 666. 22 с.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 256-261

Structure of the Support System for Making Optimal Decisions during the Decommissioning of Nuclear Facilities

V. V. Bochkarev^{*a,b*}, B. D. Brilliantov^{*a,b*}, A. V. Kryanev^{*a,c,#*}, A. A. Batsulin^{*a,b*}, S. G. Klimanov^{*a*}, O. Yu. Litvinenko^{*a,b*}, D. V. Mamai^{*a,b*}, D. E. Sliva^{*a*}, D. S. Smirnov^{*a*}, P. A. Stryapushkin^{*a,b*}, V. I. Tereshkin^{*a,b*}, and D. T. Khanbikova^{*a*}

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia ^b Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, 107140 Russia ^c Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

#e-mail: avkryanev@mephi.ru Received May 28, 2020: revised July 1, 2020: accepted July 7, 2020

Abstract—The structure of the optimal decision support system for the decommissioning of nuclear facilities is examined. The proposed structure provides the analysis of various options for decommissioning the facility under consideration for atomic energy use and the selection of the best option for decommissioning it. The system takes into account uncertainties in the source data, including uncertainties that are described using fuzzy values. The decommissioning options are evaluated by several particular indicators, reducing them to two or three aggregated indicators.

Keywords: system, decision making, decommissioning, nuclear facilities, optimal option, indicators, uncertainty

DOI: 10.1134/S2304487X20030025

REFERENCES

 Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Linge In.I., Abalkina I.L., Vedernikova M.V., Birukov D.V., Iordanov A.S., Linge I.I., Kovalchuk D.V., Kruchkov D.V., Utkin S.S., Aliksahin R.M., Hamaza A.A., Bochkarev V.V., Supataeva O.A., Kononov V.V., Tikhonovsky V.L., Ivanov O.P., Pavlenko V.I., Semenov S.G., Chesnokov A.V. Zakluchitelnii tom trehtomnoi monografii "Problemi yadernogo naslediya I puti ih resheniya", posvyashenni zavershaemomu etapu jiznennogo cikla obekta ispolzovaniya atomnoi energii — vivodu iz ekspluatacii. "Problemi yadernogo naslediya I puti ih resheniya. Vivod iz ekspluatacii". Pod obshei redakciei akademika RAN L.A. Bolshova, N.P. Laverova, chl.-kor. RAN I.I. Lingue. [The final volume of the three-volume monograph "Problems of Nuclear Legacy and the Ways of Their Solution", dedicated to the final stage of the life cycle of an atomic energy use facility — decommissioning. "The problems of nuclear legacy and ways to solve them. Removal from service". Under the general editorship of the academician of the RAS L.A. Bolshova, N.P. Laverova, Corr. RAS I.I. Linge]. M.: 2015, 316 pp.

- Abalkina I.L., Birukov D.V., Vedernikova M.V., Dorogov V.I., Ilushkin A.I., Iordanov A.S., Kovalchuk D.V., Linge I.I., Obodinski A.N., Savkin M.N., Samoilov A.A., Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Linge In.I., Kurindina L.A., Bochkarev V.V., Hamaza A.A., Shadilov A.E., Sharafutdinov R.B., Kovalchuk A.A., Kamanin A.N., Kulikov A.A., Ivanova O.I., Kosova O.E., Lavrov K.N., Starkova M.V., Barchukov V.G., Kochetkova O.A. Inventarizatsiya yaderno i radiatsionno opasnih obektov. Ojidaemie rezultati I perspektivi ih ispolzovaniya. [Inventory of nuclear and radiation hazardous facilities. Expected Results and Prospects for Their Use]. Moscow, preprint IBRAE RAS, No. IBRAE-2014-05, 2014, 39 pp.
- 3. Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Kudryavtsev E.G., Bolshov L.A., Linge I.I., Abalkina I.L., Birukov D.V., Vedernikova M.V., Hamaza A.A., Sharafutdinov R.B., Bochkarev V.V. K voprosu otsenki obema yadernogo naslediya v atomnoi promishlennosti i na inih obektah mirnogo ispolzovaniya atomnoi energii v Rossii. [On the issue of assessing the volume of nuclear legacy in the nuclear industry and other facilities for the peaceful use of atomic energy in Russia]. Nuclear and radiation safety, No. 3 (73), 2014, pp. 1–11.
- Tezici doklada "Nauchno-metodicheskoe soprovojde-4. nie meropriyatii federalnoi yselevoi programmi "Obecpechenie yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti na 2016–2020 godi i na period do 2030 goda" po podgotovke k vivodu i vivodu iz ekspluatatsii obekvov vadernogo naslediya i po obrasheniu s osobimi radioaktivnimi othodami" v obespechenie meropriyatiya "Razrabotka i prakticheskoe ispolzovanie pri vivode iz ekspluatatsii vaderno i radiatsionno opasnih obektov novih visoko tehnologichnih tehnologii". [Abstracts of the report "Scientific and methodological support for the activities of the federal target program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016-2020 and for the period until 2030 "on preparation for the decommissioning and decommissioning of nuclear heritage objects and on the management of special radioactive waste" events "Development and practical use of new highly effective technologies in the decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities"]. NTS FBU "STC NRS" dated 11/17/2016.
- Federalnaya tselevaya programma "Obecpechenie yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti na 2016–2020 godi i na period do 2030 goda" [Federal Target Program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016– 2020 and for the Period until 2030"].
- 6. International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, IAEA, 2012, 195 p.
- 7. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants. IAEA, 2016, 260 pp.
- 8. Financing the Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA, 2016, 23 pp.
- Emets P.E., Kovalevich O.M., Kryanev A.V., Sharafutdinov R.B. Matematicheskie modeli rascheta investicionnoi effektivnosti vivoda iz ekspluatatsii YaROO. [Mathematical models for calculating the investment efficiency of decommissioning a nuclear power plant]. Preprint MEPhI 002-2007. M.: MEPhI, 2007, 27 pp.

- Emets P.E., Kovalevich O.M., Kryanev A.V., Neretin V.A., Sharafutdinov R.B. Sistemni podhod pri finansirovanii meropriyatii po vivodu iz ekspluatatsii YaROO, klassifitsiruemih v zavisimosti ot kategorii ih YaROO. [A systematic approach to financing the decommissioning of nuclear weapons, classified according to the category of their nuclear weapons]. Preprint MEPhI 005-2007. M.: MEPhI, 2007, 23 pp.
- Emets P.E., Kryanev A.V. Metodika otsenki ekonomichskoi effektivnosti vivoda iz ekspluatatsii yaderno i radiatsionno opasnih obektov. [Methodology for assessing the economic efficiency of decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities], Atomic Energy Bulletin, 2008, No. 11, pp. 4–7.
- Emets P.E., Kryanev A.V. Investitsionnaya effektivnost vivoda iz ekspluatatsii yaderno i radiatsionno opasnih obektov (YaROO). [Investment efficiency of decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities (NROO)]. Nuclear and radiation safety. 2011, No. 1 (59), pp. 10–19.
- 13. Bochkarev V.V., Kryanev A.V., Hanbikova D.T. Ranjirovanie yaderno i radiatsionno opasnih obektov, ekspluatatsiya kotorih prekrashena. "Informatsionno ielekommunikatsionnie tehnologii i matematicheskoe modelirovanie vicokotehnologicheskih system": materiali Vserossiskoi konferentsii s mejdunarodnim uchastiem. [Ranking of nuclear and radiation hazardous facilities whose operation has been discontinued. "Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems": materials of the All-Russian Conference with international participation]. Moscow, PFUR, 2014, pp. 195-197 (In Russian).
- 14. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities. IAEA, 2017, 68 p.
- 15. Kryanev A.V., Lukin G.V. Matematicheskie metodi obrabotki neopredelennih dannih. [Mathematical methods for processing uncertain data], M.: Fizmatlit, 2006.
- Orlovskii S.A. Problemi prinyatiya reshenii pri nechetkoi ishodnoi informatsii [Decision problems with fuzzy source information]. M.: Nauka, 1981.
- 17. Pegat A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie. [Fuzzy modeling and control]. M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2009.
- Semenov S.S., Voronov E.M., Poltavskii A.V., Kryanev A.V. Metodi prinyatiya reshenii v zadachah otsenki kachestva i tehnicheskogo urovnya slojnih tehnicheskih system. [Decision-making methods for assessing the quality and technical level of complex technical systems]. M.: URSS, 2015.
- 19. RB-153-18 "Rekomendatsii po obosnovaniu vibora variant vivoda iz ekspluatatsii obektov ispolzovaniya atomnoi energii". Utverjdteno prikazom Federalnoi slujbi po ecologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 29 dekabrya 2018 g. ["Recommendations on the justification of the choice of option for decommissioning of nuclear facilities". Approved by order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of December 29, 2018"]. Moscow, № 666, 22 pp.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 9 № 3 2020

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, с. 262–269

> __ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА _____ И ИНФОРМАТИКА

УДК 51-76+618.36

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВЯЗИ МЕЖДУ СОСТОЯНИЕМ ПЛАЦЕНТЫ И ХРОНИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ ПОЧЕК

© 2020 г. Ю. Б. Котов^{1,*}, И. В. Баринова², И. Г. Никольская², Т. А. Семенова³

¹ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047, Россия ² Московский областной научно-исследовательский институт акушерства и гинекологии, Москва, 101000, Россия ³ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия

*e-mail: contreraskosha@yandex.ru Поступила в редакцию 06.03.2020 г. После доработки 06.03.2020 г. Принята к публикации 09.06.2020 г.

В работе обсуждаются экспериментальные результаты исследования качества кровотока в плаценте беременных пациенток, страдающих хронической болезнью почек. Контингент пациенток разбит на 5 групп (классов). 4 группы представляют собой пациенток с разными степенями тяжести заболевания. Одна группа — контрольная, пациентки которой не имеют почечных заболеваний. Морфологом проведены измерения поперечных сечений капилляров в 50 срезах ворсин плаценты, снабжающих кровью развивающийся плод, и создана база данных. Проведен непараметрический статистический анализ базы данных. Исследованы распределения числа кровеносных сосудов по группам, числа капилляров по площади сечения сосудов в каждой из групп, площади сечений капилляров по срезам ворсин, суммарной площади сосудов по ворсине и т.д. В процессе обработки данных использован двухвыборочный критерий Смирнова. Установлены явные связи между степенью тяжести заболевания и степенью васкуляризации ворсин. Показано, что увеличение степении тяжести хронической почечной болезни сопровождается уменьшением числа капилляров в ворсинах, уменьшением площади сечения капилляров, уменьшением суммарной площади капилляров в ворсинах плаценты.

Проведено сравнение результатов обработки экспериментальных данных с результатами работы авторов 2017 г., полученными методом логических симптомов, основанным на анализе словесных заключений врачей. Новые результаты согласуются с предыдущими.

Ключевые слова: хроническая болезнь почек, непараметрическая статистика, критерий Смирнова, васкуляризация ворсин плаценты, капилляры ворсин

DOI: 10.1134/S2304487X20020078

введение

Статья является продолжением совместной работы математиков и врачей Московского областного НИИ акушерства и гинекологии (МО-НИИАГ) по применению математических методов к проблемам медицинской диагностики. Ранее авторами была решена задача [1], в которой были установлены связи между степенью тяжести заболевания беременных пациенток хронической болезнью почек (ХБП) и изменениями в структуре плаценты. Задача важна для прогнозирования риска неблагоприятных исходов беременности при ХБП.

За прошедшие годы накоплен новый материал. В частности, морфологом И.В. Бариновой была исследована под микроскопом структура ворсин и измерены площади кровеносных капилляров ворсин. В этой работе мы проводим непараметрический статистический анализ базы данных, полученной при исследовании под микроскопом кровеносных капилляров ворсин.

Ранее в работе [1] исследуемым материалом в задаче были заключения морфолога, анализировавшего изменения структуры плаценты. Использовался метод логических симптомов [2], позволяющий единым способом обрабатывать как числовые, так и нечисловые (например, словесные заключения врача) данные. Метод логических симптомов по существу является расширением нечисловой статистики [3, 4].

Использование метода логических симптомов и экспертных заключений морфолога позволило выделить ряд характерных неблагоприятных признаков в структуре плаценты, сопутствующих тем стадиям заболевания, которые были выделены врачами-нефрологами. Было показано, что каж-



Рис. 1. Структура плаценты: *1* – хориальная пластинка; *2* – пупочный канатик; *3* – плодная часть плаценты; *4* – материнская часть; стрелками указана циркуляция крови в материнских сосудах; *5* – ворсины хориона; *6* – лакуны, в которые изливается из артерий материнская кровь; *7* – перегородка плаценты; *8* – спиральные артерии.

дой стадии ХБП соответствуют определенные дефекты в структуре плаценты.

В акушерской практике установлено [5—8], что увеличение степени тяжести заболевания почек у будущей матери приводит к росту числа преждевременных родов, появлению случаев развития преэклампсии, рождению детей с малой массой, врожденной пневмонией, гипоксическими поражениями центральной нервной системы.

Плацента является органом, связующим организмы матери и плода. По мере развития беременности в плаценте накапливаются и сохраняются следы процессов, происходящих в системе мать-плацента-плод во время беременности. Знание этих процессов может помочь лечащему врачу подобрать соответствующую терапию, чтобы подвести пациентку к рождению здорового ребенка. Поэтому необходимо морфологическое исследование плаценты после рождения ребенка.

Напомним строение плаценты (рис. 1). Плацента является защитным барьером, не позволяющим антителам матери проникнуть в организм плода, и органом, обеспечивающим питание, развитие и рост плода. Она состоит из двух частей плодной 3 и материнской 4 [9]. Нижняя часть 4 представляет собой материнскую часть плаценты, в которой циркулирует по артериям и венам кровь матери. Спиралеобразные артерии 8 изливают материнскую кровь в лакуны 6 плодной части плаценты 3. Верхняя пластина 1 называется хориальной, от нее отходят ворсины 5, играющие главную роль в питании плода в течение беременности. Ворсины имеют основную стволовую часть, вторичные и терминальные разветвления (ствол, ветви и листья по аналогии с деревом). Ворсины покрыты хориальным эпителием клетками трофобласта.

На ранних стадиях беременности клетки трофобласта проникают в прилежащие участки слоя 4, разрушая мышечную стенку спиральных артерий и значительно расширяя их просвет. При этом кровь из спиральных артерий 8 изливается в лакуны 6 и омывает тело ворсины. Материнская кровь в лакунах непрерывно циркулирует, поступая в них из спиральных артерий и вытекая по венам матери.

На рис. 2 изображен срез ворсины хориона на девятом месяце беременности [9]. Буквой A среди тканевых структур ворсины жирно выделены замкнутые контуры сечения стенок капилляров. Небольшие образования B внутри капилляров изображают эритроциты плода, C – просветы внутри капилляров. Питательные вещества из материнских лакун проникают сквозь трофобласт и стен-

ки капилляров ворсин (синцитиокапиллярную мембрану) и поступают в кровь плода.

Классификация беременных пациенток по степени тяжести ХБП проведена ранее нами в работе [1]. гле были использованы базы ланных беременных, собранные И.Г. Никольской. Здесь мы используем ту же классификацию и тот же контингент пациенток. На микроскопе AXIO IMAGER.M2 с помощью цифровой камеры AXIOCamMRc5 и программы Zen измерялись плошали поперечного сечения капилляров в срезах ворсин. Морфолог мышкой обводил в поле зрения микроскопа контуры сечения капилляра (А на рис. 2), затем площадь сечения каждого капилляра автоматически вычислялась программой. В каждом классе у одной из пациенток была выбрана одна ворсина плашенты. В ней были исслелованы 50 послеловательных поперечных гистологических срезов. На каждом срезе измерены площади сечения кровеносных сосудов ворсины при увеличении микроскопа 400 [10]. В срезах присутствовали от одного до десятка капилляров.

Напомним классификацию пациенток. В работе [1] были исследованы плаценты 124 женщин, родивших живых детей. Предварительная классификация женщин по степени основного заболевания была проведена врачом-морфологом на основании классификации KDOQI 2002 г. [11] по скорости клубочковой фильтрации (СКФ).

Класс А составили 70 пациенток с самой легкой степенью заболевания (стадия ХБП1), которая соответствует скорости фильтрации, равной или превышающей 90 мл/мин.

В класс **В** вошли 14 пациенток со второй стадией заболевания ХБП2, характеризующейся умеренным снижением СКФ до 60–89 мл/мин.

Класс С (22 пациентки) со стадией ХБП3, это начальная хроническая почечная недостаточность (СКФ ~ 30–59 мл/мин).

К классу D (5 пациенток) отнесены пациентки с самой тяжелой стадией заболевания ХБП4. Это предлиализная хроническая почечная недостаточность с выраженным снижением СКФ до 15–29 мл/мин.

13 благополучных пациенток, без болезней почек, образовали контрольную группу (класс) Z.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведем экспериментальные результаты исследования ворсин плаценты. На рис. 3 представлены для каждого класса функции распределения вероятности W по площади капилляров ворсин хориона. Обозначения классов пациенток приведены рядом с кривыми.

Из рис. 3 следует, что в классе Z благополучных пациенток к моменту родов капилляры имеют наибольшую площадь поперечного сечения по



Рис. 2. Часть поперечного сечения ворсины хориона.

сравнению с капиллярами пациенток остальных классов. С вероятностью W > 50% площади сечений капилляров в классе Z превышают значения S ≈ 600 мкм². С высокой вероятностью, близкой к единице, встречаются капилляры с площадями от 1500 до 3000 мкм². У классов A и C редкие капилляры достигают максимальных сечений от 1000 до 1500 мкм². У всех классов с ХБП (A, B, C) основная доля капилляров имеют площади сечения, меньшие 500 мкм².

Проведено сравнение распределений по площади капилляров ворсин в каждом из классов с распределением в классе здоровых Z. Подсчитаны суммарные площади капиллярных просветов по каждому из 50 срезов ворсины. Использован для сравнения распределений по срезам двухвыборочный критерий Смирнова при уровне значимости 0.05. Результаты приведены в табл. 1.

В первом столбце указаны названия классов, а запись с помощью слова to указывает на то, что распределение по площади капилляров в срезе каждого класса сравнивается по критерию Смирнова с аналогичным распределением в классе здоровых пациенток Z. Во втором столбце приве-

Таблица 1. Распределение площади сечения капилляров по срезам в одной ворсине

Сравниваемые классы	Распределение площади капилляров по срезам ворсины S мкм ²	р
1	2	3
Ζ	1123 (792, 2529)	
A to Z	497 (265, 1037)	9.93×10^{-6}
B to Z	204 (112, 356)	7.53×10^{-16}
C to Z	402 (259, 652)	0.10×10^{-11}
D to Z	104 (39, 228)	2.58×10^{-18}
Z to ABCD		2.01×10^{-18}



Рис. 3. Функции распределения по площади капилляров в ворсинах: А – в ворсине пациентки со стадией ХБП1; В – в стадии ХБП2; С – ХБП3; D – ХБП4; Z – у здоровой пациентки.

дены медианы суммарных площадей просветов в срезах. В скобках 2-го столбца указаны нижний и верхний квартили распределения. В последней строке таблицы все распределения в классах А, В, С, D объединены в одно распределение, а распределение по срезу в классе Z сравнивается с объединенным распределением. В третьем столбце выписаны вероятности р по Смирнову, указывающие на качество разделения двух классов. Чем меньше р, тем меньше вероятность совпадения распределений. В таблице эти вероятности много меньше единицы. Распределения хорошо разделены. Наименее всего перекрываются распределения классов D и Z, а также распределение у Z с объединением A, B, C, D (степень вероятности: -18). Наименьшая среди всех классов медиана распределения по срезам у пациенток класса D

Таблица 2. Характеристики распределения площади поперечного сечения по капиллярам в каждом классе

Класс	N	S _{min} , мкм ²	q1, мкм ²	med, мкм ²	q2, мкм ²	S _{max} , мкм ²
1	2	3	4	5	6	7
Ζ	288	14	89	172	425	2977
А	228	2	48	102	180	1702
В	190	1	21	46	83	573
С	240	2	29	54	120	1493
D	156	1	11	24	53	1192

(med = 104 мкм^2 , самая тяжелая степень ХБП). Самая большая — в классе Z: med = 1123 мкм^2 . При переходе от класса Z к более тяжелым по ХБП классам просматривается тенденция к уменьшению суммарной площади капилляров в срезе.

Более подробное исследование распределений плошали сечений по капиллярам представлено в табл. 2. Первый столбец содержит имена классов. Вторая строка – номера столбцов. Остальные строки – характеристики распределения площадей. Во втором столбце указано полное число N капилляров в ворсине (сумма по всем срезам в ворсине каждого класса). В третьем столбце приведены для каждого класса минимальные площади (S_{min}) сечения капилляров (самые тонкие сосуды), аналогично в седьмом размещены максимальные значения площади S_{max} (самые толстые сосуды). Медианы (med) распределений размещены в 5-м столбце, в четвертом и шестом даны значения нижнего (q1) и верхнего (q2) квартилей. Из таблицы видно, как велик разброс площадей капилляров.

Медиана площади капилляров заметно уменьшается с ростом тяжести заболевания: медиана в классе Z более чем в 7 раз превышает медиану в классе D. У всех пациенток с ХБП самые тонкие капилляры в ворсине: $S_{min} = 1-2 \text{ мкм}^2$, тогда как в классе здоровых Z $S_{min} = 14 \text{ мкм}^2$. В работе [10] отмечается, что при измерениях под микроскопом встречались сосуды без просветов, целиком заполненные эндотелием. В классе здоровых пациенток встречаются и очень "толстые" капилляры $S_{max} = 2977 \text{ мкм}^2$, а в классе В, например, $S_{max} = 573 \text{ мкм}^2$. В целом из табл. 2 видно, что в классе Z в сумме на пятидесяти срезах и самое большое число капилляров N, и все они гораздо крупнее по сечению, чем у всех пациенток с хронической болезнью почек.

Квартильные интервалы распределений площади сечений капилляров в классах А, В и С в табл. 2 перекрываются, особенно сильно у классов С и D. Напомним, что априорное разделение на классы проводилось врачами по уровням СКФ, принятым международным медицинским сообществом. Границы этого разделения приблизительны, поэтому априорное разделение только по одному признаку не может быть строгим. Однако из табл. 2 видна тенденция к снижению общего числа капилляров в ворсине и снижению их площади сечения по мере роста тяжести основного заболевания.

Рассмотрим теперь распределение числа капилляров внутри каждого класса по величине площади их сечений (табл. 3). Используя программу одномерного анализа попарного сравнения классов и применяя двухвыборочный критерий Смирнова, получаем наилучшие пороги разделения распределений попарных классов: $S_1 = 19$, $S_2 = 26$, $S_3 = 84$, $S_4 = 167.5$ мкм² по площади сечения капилляров. В верхней строке табл. 3 указаны интервалы между порогами разделения площади. Обозначения классов приведены в первом столбце. В строках табл. 3 указан для каждого класса процент числа капилляров, площади которых принадлежат разным интервалам между порогами.

Жирными рамками на табл. 3 выделены два числа. В классе здоровых Z более 50% всех сосудов ворсины "толстые" — имеют площади сечения свыше 167.5 мкм². И только 1.4% (4 капилляра из 288) очень тонкие (S < 19 мкм²). В классе D самых тяжелых пациенток, наоборот, значительное число сосудов (41.7%) не превышают по сечению 19 мкм². А крупных сосудов, с площадью свыше 167.5 мкм², очень мало: 5.1% (8 капилляров из 156 в ворсине). По мере увеличения степени тяжести заболевания видна тенденция увеличения числа очень тонких капилляров и снижение числа сосудов с большой площадью сечения.

Из анализа приведенных распределений следует, что при тяжелой форме хронического заболевания почек плохо происходит васкуляризация кровеносных сосудов. Чем тяжелее степень ХБП, тем меньше в ворсинах капилляров, тем меньше их суммарная площадь поперечного сечения в срезе и тем тоньше сами капилляры. Это означает, что плод, получающий питание через капилляры ворсин из материнской крови, при ХБП

Таблица 3. Распределение числа капилляров по площадям их сечений в каждом классе

S , м	км ²	<19	19 < S < 26	26 < S < 84	84 < S < 167.5	>167.5
Ζ	%	1.4	3.8	17.7	25.7	51.4
Α	%	3.5	3.9	34.6	30.7	27.2
В	%	21.6	14.2	39.5	12.6	12.1
С	%	10.0	9.6	44.2	20.0	16.3
D	%	41.7	9.6	32.1	11.5	5.1

плохо растет и медленно развивается. В медицине принят термин "раннее созревание плаценты", когда еще до срока родов прекращается рост ворсин и сосудов в них. Статистический анализ связей между ХБП и степенью васкуляризации ворсин плаценты подтверждает возникновение диагноза "раннее созревание плаценты" с ростом тяжести ХБП. Преждевременное созревание ворсин означает, что задолго до срока родов прекращается рост вторичных и терминальных ворсинок и тем самым не развиваются новые капилляры, питающие кровью пуповину плода.

В работе [1] мы приводили таблицу распределения морфологических симптомов по классам пациенток. Повторяем здесь ту же таблицу (см. табл. 4), добавив строку с результатами эксперимента по определению площади капилляров в ворсинах. В последней строке ее указаны максимальные значения накопленной площади капилляров S_{max} ворсин в каждом классе, т.е. сумма площадей поперечного сечения капилляров в срезе, просуммированная по всем срезам ворсины в каждом классе.

В каждой ячейке соответствующего класса (кроме последней строки) приведены два числа. Слева указано число пациенток, у которых обнаружен данный симптом, а справа — приблизительный процент пациенток в своем классе, обладающих этим признаком.

Напомним, в работе [1] было показано, что классу D присущи три морфологических признака, отличающие его от других классов. Перечислим их.

 У всех пяти пациенток класса D было обнаружено при исследовании плаценты преждевременное созревание ворсин (код симптома 025).
 Этот же признак проявился только у двух пациенток из 70 самого легкого (ХБП1) и самого многочисленного класса А.

2) Все 5 пациенток класса D страдали артериальной гипертензией (код 038), а две женщины класса D находились в состоянии тяжелой преэклампсии (код 040). Преэклампсия при ХБП осложняет течение беременности, сопровождается артериальной гипертензией [12] и может привести к гибели и матери, и плода.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВЯЗИ

Код	Назрание симптома	Класс	Ζ	А	В	С	D	
симптома	пазвание симптома	Число пациенток	13	70	14	22		5
028	облитерационная ангиопатия	1 8%	_	_	_		_	
034	межворсинчатая гематома		4 31%	_	_	_		_
025	преждевременное созревание в	_	2 3%	_	_	5	100%	
030	многочисленные синцитиальны	—	26 37%	_	—		_	
038	артериальная гипертензия	_	29 41%	9 64%	15 70%	5	100%	
041	гепаринотерапия		—	—	_	_		_
032	фибриноид распространенный,	псевдоинфаркты	—	—	4 28%	6 27%		_
033	патология базальной пластинки	I	_	_	2 14%	2 9%		_
035	инфаркт плаценты	—	—	3 22%	1 5%		_	
020	плацента с ободком/валик. экст	—	—	—	7 32%		—	
040	преэклампсия тяжелая	—	—	_	_	2	40%	
S	накопленная площадь капилля	ров в ворсине, 10 ² мкм ²	9	3	1.5	2		1.7

Таблица 4. Распределение некоторых медицинских симптомов по классам

3) Более того, артериальная гипертензия, как указано в работе [1], приводит в свою очередь к поражениям почек. Во всех остальных классах с ХБП также встречались пациентки с гипертензией (особенно часто в классе С). Однако в большинстве случаев ее удавалось в той или иной мере скомпенсировать. Теперь мы можем утверждать, что самый тяжелый класс D выделился и наличием тяжелой формы гипертензии (код 038) и преждевременным созреванием ворсин (код 025 в табл. 4). Этот симптом встречается кроме класса D еще только у 3% пациенток многочисленного класса А.

Таким образом, обсуждаемое в этой статье снижение числа капилляров и уменьшение их площадей поперечных сечений, как и суммарной площади капилляров, по-видимому, связано со степенью поражения почек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен статистический анализ распределений площади сечений кровеносных сосудов в ворсинах хориона плаценты у матерей с хронической почечной болезнью. Сравнение распределений для групп пациенток с четырьмя стадиями ХБП и группы здоровых показало, что суммарная площадь сечения капилляров тем меньше, чем выше степень тяжести ХБП. Чем хуже работа почек, тем хуже прорастают капилляры в ворсинах. Чем тяжелее заболевание, тем меньше капилляров в ворсине, и в основном они очень тонкие. У здоровых пациенток и число капилляров в разы больше, и сами капилляры обладают большими сечениями (толстые).

Уменьшение площади просвета капилляров и числа самих капилляров должно приводить к

снижению кровотока в пуповине плода и ухудшению питания плода. Это явление связано с преждевременным созреванием ворсин или "старением" плаценты. Авторы работ [13–15] указывают, что преждевременное созревание ворсин может возникать в случае тяжелого осложнения – преэклампсии, сопровождающейся гипоксией плода. Отметим, что 2 из 5 пациенток класса D находились в состоянии преэклампсии перед родами.

Полученные результаты согласуются с табл. 4 и работой [1]. В работах [11, 12] показано, что рост степени тяжести ХБП приводит к снижению массы и размеров тела новорожденных, к нарушениям функций дыхания и центральной нервной системы. По-видимому, причиной ухудшения состояния матери с ХБП и плода является плохое питание плода, обусловленное гиповаскуляризацией ворсин и преждевременным созреванием.

Работа выполнена при поддержке программы Повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Баринова И.В., Котов Ю.Б., Никольская И.Г., Семенова Т.А. Многомерный математический метод классификации пациентов // Вестник НИЯУ МИФИ, 2017. Т. 6. № 2. С. 183–190. https://doi.org/10.1134/S2304487X17020031
- Котов Ю.Б. Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики. М.: Едиториал УРСС, 2004. 328 с.
- 3. *Орлов А.И.* Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004. 513 с.
- Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. Ч. 1. Нечисловая статистика. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 541 с.

- Никольская И.Г., Прокопенко Е.И., Новикова С.В. и др. Осложнения и исходы беременности при хронической почечной недостаточности // Альманах клинической медицины. 2015. Т. 37. С. 52–69.
- Никольская И.Г., Новикова С.В., Баринова И.В. и др. Хроническая болезнь почек и беременность: этиология, патогенез, классификация, клиническая картина, перинатальные осложнения // Российский вестник акушера-гинеколога. 2012. Т. 12 (5). С. 21–30.
- Никольская И.Г., Новикова С.В., Будыкина Т.С. и др. Беременность при хронической почечной недостаточности: тактика ведения и родоразрешения при консервативно-курабельной стадии // Российский вестник акушера-гинеколога. 2012. Т. 12 (6). С. 21–8.
- Прокопенко Е.И., Никольская И.Г. Беременность у женщин с хронической почечной недостаточностью // Врач. 2013. (8). С. 9–17.
- Афанасьев Ю.И., Юрина Н.А., Котовский Е.Ф. и др. Гистология, эмбриология, цитология: учебник. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. 800 с.

- Баринова И.В., Никольская И.Г., Котов Ю.Б., Прокопенко Е.И., Кондриков Н.И. Плацента при хронической болезни почек у беременных // Акушерство и гинекология, 2020. № 1. С. 169–177. https://doi.org/10.18565/aig.2020.1.169-177
- 11. KDOQI Clinical Practice Guidelines for Chronic Kidney Disease: Evaluation, Classification, and Stratification. Am J Kidney Dis. 2002. V. 2 Suppl. № 1. P. 1–246.
- 12. *Никольская И.Г.* Беременность и хроническая болезнь почек: гестационные осложнения, материнские и перинатальные исходы. Докт. дисс. М., 2019. 277 с.
- Милованов А.П. Патология системы мать—плацента—плод. М.: Медицина, 1999. 448 с.
- Айламазян Э.К., Лапина Е.А., Кветной И.М. "Старение" плаценты // Ж. акушерства и женских болезней, 2004. Т. 53. Вып. 2. С. 4–10.
- 15. Сидорова И.С. Гестоз. М.: Медицина, 2007. 340 с.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 2, pp. 262-269

Statistical Analysis of the Relationship between Placenta Condition and Chronic Kidney Disease

Yu. B. Kotov^{a,#}, I. V. Barinova^b, I. G. Nicolskaya^b, and T. A. Semenova^c

^a Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047 Russia ^b Moscow Regional Research Institute of Obstetrics and Gynecology, Moscow, 101000 Russia ^c National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

#e-mail: contreraskosha@yandex.ru

Received March 6, 2020; revised March 6, 2020; accepted June 9, 2020

Abstract—The blood flow quality in placenta of pregnant women suffering from chronic kidney disease has been experimentally studied. The patients are divided into five groups (classes). Four groups represent patients with varying disease severity degrees and the fifth, control group consists of patients without kidney disease. Cross sections in 50 slices of the placental villi, which supply the fetus with blood, have been measured and summarized in a database. This database has been analyzed by non-parametric statistic methods. In each group, distributions of the capillaries over cross-sectional areas along villus, over cross-sectional areas in villi slices, over cross-sectional areas for all capillaries of group, over the summary cross-sectional areas of the capillaries, etc. have been studied. Data processing has involved the two-sample Smirnov criterion. Explicit relations have been established between the disease severity and the degree of villi vascularization. It has been shown that an increase in the severity of chronic kidney disease is accompanied by a decrease in the number of capillaries in the villus, in the cross-sectional area of capillaries, and in the total area of capillaries in villi. The results of experimental data processing are compared to our results obtained in 2017 by the logical symptoms method based on the analysis of verbal doctor conclusions. New results are consistent with previous ones.

Keywords: chronic kidney disease, non-parametric statistics, Smirnov criterion, vascularization of placental villi, villus capillaries

DOI: 10.1134/S2304487X20020078

REFERENCES

1. Barinova I.V., Kotov Yu.B., Nicolskaya I.G., Semenova T.A. Mnogomernyj matematicheskiyj metod klassifikatsii patsientov [Multivariate Mathematical Method of Patients Classification], *Vestnik NIYaU MIFI*, 2017. V. 6, № 2. P. 183–190. doi: 10.1134/S2304487X17020031
- Kotov Yu.B. Novye matematicheskiye podkhody k zadacham meditsinskoy diagnostiki [New mathematical approach to medical diagnostic problems]. Moscow, Editorial URSS, 2004. 328 p.
- Orlov A.I. Nechislovaja statistica [Non-numeric Statistics]. Moscow, MZ-Press, 2004. 513 p.
- Orlov A.I. Organizatsionno-economicheskoe modelirovanie. Part 1. Nechislovaja statistica [Organizational and economic modeling. Part 1. Non-numeric statistics]. Moscow, MSTU im. N.E. Bauman, 2009. 541 p.
- Nikolskaya I.G., Prokopenko E.I., Novikova S.V. at all. Oslozhnenija i iskhody beremennosti pri khronicheskoj pochechnoj nedostatochnosti [Complications and outcomes of pregnancy in chronic kidney disease]. *Almanakh klinicheskoj mediciny*, 2015, vol. 37, № 3, pp. 52– 69.
- Nikolskaya I.G., Novikova S.V., Barinova I.V. at all. Khronicheskaja bolezn pochek i beremennost: etiologija, patogenez, klassifikatsija, klinicheskaja kartina, perinatal'nye oslojnenija [Chronic kidney disease and pregnancy: etiology, pathophysiology, classification, clinical picture and perinatal complications]. *Rossiyskiy vestnik akushera-ginekologa*, 2012, vol. 12, № 5, pp. 21–30.
- 7. Nikolskaya I.G., Novikova S.V., Budykina T.S. et all. Beremennost pri khronicheskoj pochechnoj nedostatochnosti: taktika vedenija i rodorazreshenija pri konservativno-kurabelnoj stadii [Pregnancy in chronic renal failure: strategies of management and delivery at its conservatively curable stage]. *Rossiyskiy vestnik akushera-ginekologa*, 2012, vol. 12, № 6, pp. 21–28.

- Prokopenko E.I., Novikova S.V. Beremennost u zhentschin s khronicheskoj pochechnoj nedostatochnostju [Pregnancy in women with chronic renal failure]. *Vrach*, 2013. № 8. P. 9–17.
- Afanasjev Y.I., Jurina N.A., Kotovskil E.F. et all. *Gis-tologija, embriologija, tsitologia* [Histology, embryology, cytology: textbook]. Moscow, GEOTAR-Media, 2018. 800 p.
- Barinova I.V., Nikolskaya I.G., Kotov Yu.B., Prokopenko E.I., Kondrilov N.I. Platsenta pri khronicheskoj bolezni pochek u beremennykh [Placenta in pregnant women with chronic kidney disease]. *Akusherstvo i* ginekologia, 2020. no. 1. P. 169–177. https://doi.org/10.18565/aig.2020.1.169-177
- 11. KDOQI Clinical Practice Guidelines for Chronic Kidney Disease: Evaluation, Classification, and Stratification. Am J Kidney Dis., 2002, vol. 2 Suppl., № 1, pp. 1–246.
- Nikolskaya I.G. Beremennost i khronicheskaja bolezn pochek: gestatsionnye oslozhnenia, materinskie i perinatalnye iskhody. Dokt. Diss. [Pregnancy and chronic kidney disease: gestational complications, maternal and perinatal outcomes. Doct. Diss.]. Moscow. 2019. 277 p.
- Milovanov A.P. Patologija sistemy mat' platsenta plod [Pathology of the mother – placenta – fetus system]. Moscow, Medicina, 1999. 448 p.
- 14. Ailamazian E.K., Lapina E. A., Kvetnoj I.M. "Starenie" placenty [Placenta "aging"]. *Journal akusherctva i zhenskikh boleznej*, 2004, vol. 53, № 2. pp. 4–10.
- Sidorova I.S. *Gestoz* [Gestosis]. Moscow, Medicina, 2007. 340 p.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, с. 270–278

__ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА _____ И ИНФОРМАТИКА

УДК 004.422.635.5

МЕТОД КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МОНИТОРИНГА

© 2020 г. А.А. Моисеев*

Технос — РМ, Мытищи, 141002, Россия *e-mail: slow.coach@yandex.ru Поступила в редакцию 28.01.2020 г. После доработки 26.03.2020 г. Принята к публикации 08.09.2020 г.

Современные системы распределенного мониторинга включают устройства наблюдения и регистрации различных типов. Разнородность формируемых ими данных порождает проблемы, связанные: — с объединением разнородных данных от различных источников, зачастую слабо связанных;

 противоречивостью, неполнотой и неточностью данных в отсутствие априорной идентификации наблюдаемых объектов;

- требованием оперативной обработки большого объема разнородной информации.

В данной работе рассматриваются алгоритмы обработки разнородных данных, обеспечивающие агрегирование последних с целью приведения к обозримому виду, удобному для получения аналитических выводов, повышения их надежности и принятия решений. Предлагаемый подход к комплексированию данных от разнородных источников состоит в использовании объединенного вектора признаков объектов. Дополнительной проблемой при этом является необходимость реализации комплексирования на единой формальной основе. Однако задача настолько назрела, что попытки создания такой основы на базе метода функционального шкалирования представляются вполне оправданными. Внутри этого направления развивается подход, основанный на переходе от исходных показателей к обобщенным, обрабатываемым численными методами. Последние ориентированы на решение следующих задач:

– снижение размерности векторов признаков за счет предварительного отбора наиболее информативных показателей;

– рациональная оцифровка анализируемых признаков;

 – разбиение совокупности объектов на некоторое число однородных классов в рамках автоматической классификации без учителя;

– статистический анализ эффективности проведенного разбиения.

Для отображения признаков объекта используются номинальные (бинарные), порядковые (целочисленные) и относительные (действительные) показатели (переменные), нормированные к диапазону (0.1). В работе продемонстрировано преимущество евклидовой и манхэттенской метрик в пространстве нормированных переменных, состоящее в возможности естественным образом сформировать порог различения на базе критерия Неймана–Пирсона. Приведены также примеры формирования переменных различного типа и их использования на практике.

Ключевые слова: распределенный мониторинг, разнородные данные, агрегирование (комплексирование) данных, функциональное шкалирование, евклидова метрика, манхэттенская метрика, критерий Неймана–Пирсона

DOI: 10.1134/S2304487X20030062

Наиболее значимой составляющей автоматизированной обработки информации является автоматический анализ данных. Наряду с классическими процедурами статистического анализа – факторного, дисперсионного, дискриминантного и др. – он также включает ряд дополнительных процедур, не связанных напрямую со статистическим анализом [1]. К ним, в частности, относится процедура распознавания в отсутствие априорной идентификации объектов. В рамках данной процедуры особо выделяется направление, связанное с агрегированием (комплексированием) данных от разнородных источников. Целью этого комплексирования является, в конечном счете, предварительная идентификация объекта. Исходной при решении этой задачи традиционно является совокупность стандартизированных параметров, определяющая образ объекта в рамках его системного окружения. Обычно этот образ характеризуется положением в пространстве пара-

метров, а задача идентификации эквивалентна привязке этого положения к соответствующей области, сформированной в ходе предварительной классификации. Последняя в этих условиях сводится к разбиению этого пространства на области решений, соответствующие характеристикам отдельных объектов. Возможным методом решения этой задачи является предварительная кластеризация указанного множества точек на этапе обучения без учителя с последующей фиксацией границ областей. Предварительная оценка параметров объектов может проводиться методом редукции на основе модели измерения, базирующейся, например, на основном соотношении пассивной локации [2]. Настройка параметров модели, интерпретируемых как параметры наблюдаемого сигнала, осуществляется с помощью статистического или прямого перебора. Таким образом, метод редукции представляет собой модельно-ориентированный метод оценки параметров отдельного источника по результатам наблюдения принятого от него сигнала.

ЗАДАЧА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

В рамках проводимого рассмотрения источниками данных являются системы распределенного мониторинга, которые имеют сложную структуру и включают устройства наблюдения и регистрации различных типов. Данные устройства предназначены для определения разных параметров, связанных с выполнением тех или иных функций: обнаружения, принятия решений и др. При этом возникают проблемы, связанные:

 – с объединением разнородных данных от различных источников, зачастую слабо связанных;

 противоречивостью, неполнотой и неточностью данных в отсутствие априорной идентификации наблюдаемых объектов;

 требованием оперативной обработки большого объема разнородной информации.

В данных условиях требуется разработка новых методов и моделей, обеспечивающих агрегирование разнородных данных с целью приведения последних к обозримому виду, удобному для получения аналитических выводов, повышения их надежности и принятия решений [3].

Для анализа информации требуется не только ее сбор, но и представление в приемлемом для дальнейшего анализа виде в ходе стандартизации. Дополнительной проблемой при этом является то, что реализация комплексирования на единой формальной основе осложняется мозаичным характером используемых на практике моделей и алгоритмов. Однако задача настолько назрела, что первые попытки создания такой основы уже предпринимаются, например, на базе метода функционального шкалирования [4]. В свою очередь, внутри этого направления развивается подход, основанный на переходе от исходных показателей к обобщенным, позволяющим, в частности, снизить размерность номенклатуры используемых показателей. К этому направлению относятся, в частности, методы метрического и неметрического и шкалирования, предназначенные для формирования векторов обобщенных показателей (переменных) для признаков.

Одним из наиболее перспективных методов агрегирования, основанном на этой базе, является метод динамических сгущений [5], ориентированный на решение следующих основных задач:

 – снижение размерности векторов признаков за счет предварительного отбора наиболее информативных показателей;

рациональная оцифровка анализируемых признаков;

 – разбиение совокупности объектов на некоторое число однородных классов в рамках автоматической классификации без учителя;

 статистический анализ эффективности проведенного разбиения.

Возможный подход к комплексированию данных от разнородных источников состоит в использовании объединенного вектора признаков объектов, общего для всех них. Для различных типов данных используется, разумеется, лишь часть компонент этого вектора, и лишь объединение данных позволяет сформировать его полностью. Безусловно, номенклатуры признаков для разных объектов могут отличаться. В этих условиях в составе единого вектора признаков должны отображаться факты наличия или отсутствия тех или иных признаков.

Естественным методом этого отображения является введение в состав вектора признаков соответствующих бинарных компонент, которые фактически представляют собой номинальные переменные. Помимо них в состав признаков могут входить номинальные компоненты с несколькими состояниями. Ради сохранения единообразия представления компонент было предложено характеризовать различные состояния номинальных признаков отдельными бинарными компонентами [6]. Относительные переменные в ходе стандартизации нормируются в их диапазоне в соответ-

ствии с соотношением $x = \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \in (0,1)$, где N – значение переменной, а (N_{\min}, N_{\max}) – ее диапазон. Аналогичным образом нормируются порядковые переменные: $x = \frac{O - O_{\min}}{O_{\max} - O_{\min}} \in (0,1)$, где O – текущее значение порядковой переменной, а (O_{\min}, O_{\max}) – диапазон номеров ее состояний в порядке возрастания. Подобная нормировка выглядит довольно грубой, однако, с точки зрения принципа недостаточного основания, представляется вполне логичной. Таким образом, в результате проведенной декомпозиции номинальных переменных и нормировки относительных и порядковых все компоненты вектора признаков представляются в диапазоне (0.1).

МЕРЫ БЛИЗОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕ ПРИЗНАКОВ

Возможной мерой близости в пространстве векторов номинальных признаков является коэффициент корреляции по Пирсону, определяемый соотношением:

$$k_P = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a+b)(a+c)(b+c)(b+d)}},$$

где a — число признаков, которыми обладают оба объекта; d — число признаков, которыми не обладают оба объекта; b — число признаков, которыми обладает только объект 1; c — число признаков, которыми обладает только объект 2.

Этот коэффициент может служить мерой близости между объектами только в случае, когда используются исключительно номинальные (бинарные) признаки, что, разумеется, снижает его ценность.

Противоположная ситуация возникает при использовании информационной (шенноновской) метрики. В случае использования нормировки по диапазону нормированные переменные x_{i1}, x_{i2}, относящиеся к разным объектам, могут быть использованы для формирования шенноновских норм вида [7]:

$$I_{1} = \ln n - \sum_{i=1}^{n} x_{1i} \ln \frac{1}{x_{1i}},$$
$$I_{2} = \ln n - \sum_{i=1}^{n} x_{2i} \ln \frac{1}{x_{2i}},$$

где n — размерность вектора признаков. Смысл этих норм — избыток информации в векторах признаков, формально рассчитанной по переменным x_{1i}, x_{2i} . Последние при этом интерпретируются как частные вероятности признаков, а избыток рассчитывается относительно ситуации равновероятности последних. Эти нормы могут быть использованы для формального определения шенноновской метрики вида $M_S = |I_1 - I_2|$. Очевидно, однако, что эффективными здесь являются только относительные переменные, поскольку бинарные в обеих нормах автоматически обнуляются.

В этих условиях более естественными представляются евклидова метрика, базирующаяся на соотношении $M_E = \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_{1i} - x_{2i})^2}{\sigma^2}$, а также манхэт-

тенская метрика вида $M_M = \sum_{i=1}^n \frac{|x_{1i} - x_{2i}|}{\sigma}$. Здесь i = 1, ..., n, номера компонент вектора признаков, n -его размерность, а 1, 2 – номера сравнивае-

мых объектов, $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$, где $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \frac{1}{12}$ – дисперсии нормированных переменных, предполагаемых равномерно распределенными в диапазоне (0, 1). С учетом нормировки величину евкли-

чайную величину с распределением Пирсона $\chi^2_{n-1}(M_E)$. Это обстоятельство является очень удобным, поскольку позволяет задать порог различения объектов по критерию Неймана—Пирсона, исходя из естественного требования по вероятности ошибки первого рода [8].

довой метрики можно интерпретировать как слу-

Близкий подход использовался в задаче формирования эталонов в ходе параметрической дискриминации [9], базирующейся на метрике Кларка вида:

$$\rho(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{1i} - x_{2i}}{\frac{x_{1i} + x_{2i}}{2}} \right)^2.$$
(1)

Предположим, что при наличии эталона x_0 , в параметрическом пространстве наблюдается совокупность параметров *x*. В этом случае строится промежуточный эталон $x_1 = \frac{x_0 + x}{2}$ и в соответствии с (1) рассчитываются метрики $\rho(x_1, x_0)$, $\rho(x_1, x)$. Эти метрики, в свою очередь, используются для формирования решающей статистики вида [10]:

$$f_{0x} = \frac{\max(\rho(x_1, x_0), \rho(x_1, x))}{\min(\rho(x_1, x_0), \rho(x_1, x))}.$$
 (2)

Поскольку определенная выше статистика близка к оценке дисперсии для вариации, статистика f_{0x} имеет распределение Фишера $F_{0x} =$ $= F(f_{0x}, n-1, n-1)$. При этом решение $x \in O(x_0)$ принимается по критерию Фишера, если $F_{0x} < P$, где $P \in (0.9, 0.999)$ – доверительная вероятность различения совокупностей параметров, дополнительная к вероятности ошибки первого рода [8]. При невыполнении этого неравенства принимается решение $x \notin O(x_0)$.

Алгоритм параметрической дискриминации включает поэтапное обучение. Пусть на первом этапе обучения наблюдаются совокупности x_1, x_2 . Как и ранее формируется промежуточная сово-

купность $x_3 = \frac{x_1 + x_2}{2}$. В соответствии с (1) для нее

формируются метрики $\rho(x_1, x_3)$, $\rho(x_2, x_3)$, а в соответствии с (2) — решающая статистика вида:

$$f_{12} = \frac{\max(\rho(x_1, x_3), \rho(x_2, x_3))}{\min(\rho(x_1, x_3), \rho(x_2, x_3))}.$$
 (3)

В соответствии с критерием Фишера, если выполняется условие $F_{12} = F(f_{12}, n-1, n-1) < P$, считается, что $x_1, x_2 \in O(x_0)$. В противном случае x_1, x_2 интерпретируются как разные эталоны.

Предположим, что совокупность *х* наблюдается при наличии нескольких эталонов. Для каждой новой совокупности *х* находится эталон x_0 , обеспечивающий минимум метрики $\rho(x_0, x)$ среди всех определенных эталонов. Для этого эталона с использованием описанного выше метода проверяется условие $x \in O(x_0)$. При выполнении этого условия *х* классифицируется как относящийся к эталону x_0 . В противном случае *х* интерпретируется как новый эталон x_{00} и для него инициируется этап обучения установкой показателя k = 1. При отнесении *x* к x_0 , т.е. при выполнении условия $x \in$ $\in O(x_0)$, обучение состоит в коррекции соответствующего эталона для очередной совокупности *x* в соответствии с соотношениями:

$$k \to k+1,$$

 $x_{00} \to \left(1 - \frac{1}{k+1}\right) x_{00} + \frac{x}{k+1}.$ (4)

Показатель для прочих эталонов корректируется в соответствии с соотношением $k \rightarrow k - 0.05$. Решение о дальнейшей судьбе эталона принимается по величине показателя k. Если в ходе обучения оказывается, что k < 0.1, соответствующий эталон удаляется из набора эталонов. Если k > 10, обучение завершается и эталон фиксируется. Введенные параметры коррекции показателя kуказаны по умолчанию и могут быть изменены в ходе настройки алгоритма.

При отсутствии в составе используемого программного пакета встроенных статистических функций для распределения Фишера можно использовать аппроксимацию, базирующуюся на использовании бета-распределения [11]:

$$F(f, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = I_x \left(\frac{\mathbf{v}_2}{2}, \frac{\mathbf{v}_1}{2}\right),$$
$$x = \frac{\mathbf{v}_2}{\mathbf{v}_2 + \mathbf{v}_1 f},$$

где F — распределение Фишера; f — статистика Фишера вида (3); v_1 , v_1 — числа степеней свободы; I_x — бета-распределение.

Как и выше, указанное распределение используется для формирования порога различения по допустимой вероятности ошибки первого рода в соответствии с критерием Неймана–Пирсона. Предложенный подход имеет очевидные преимущества в сравнении с традиционным [12]. Они связаны, во-первых, с тем, что необходимость в предварительном центрировании вектора признаков отпадает. А во-вторых, с тем, что снимается также вопрос о произвольности выбора порога различения.

Что касается манхэттенской метрики, то в общем случае распределение ее отдельного слагаемого q определяется соотношением [13]:

$$\rho(q) = \frac{\exp\left(-\frac{(q-q_0)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}} + \frac{\exp\left(-\frac{(q+q_0)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (5)$$
$$q_0 = \frac{m_1 - m_2}{\sigma},$$

где m_1, m_2 — математические ожидания нормированных компонент для сравниваемых объектов, σ^2 — дисперсия этих компонент. У объектов одного класса эти математические ожидания естественно считать одинаковыми. В этом случае $q_0 = 0$ и нормированное слагаемое имеет распределение

$$\rho(q) = 2 \frac{\exp\left(-\frac{q^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}},$$
т.е. близко к нормальному.

Его дисперсия на интервале переменной (0,1) составляет [14]:

$$d = 2\int_{0}^{1} \frac{\exp\left(-\frac{q^{2}}{2\sigma^{2}}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}q^{2}dq - \left(2\int_{0}^{1} \frac{\exp\left(-\frac{q^{2}}{2\sigma^{2}}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}qdq\right)^{2},$$

или, после замены переменной $u = \frac{q^2}{2\sigma^2}$:

$$d = \frac{2\sigma^2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{1}{2\sigma^2}} \sqrt{u} e^{-u} du - \left(\sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\frac{1}{2\sigma^2}} e^{-u} du\right)^2.$$

После вычисления интегралов получаем [14]:

$$d = 2\sigma^2 \gamma \left(\frac{1}{2\sigma^2}, \frac{3}{2}\right) - \frac{2\sigma^2}{\pi} \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right)\right)^2, \quad (6)$$

где ү – функция гамма-распределения.

В предположении о равномерном распределении нормированных компонент векторов признаков получаем для дисперсии $\sigma^2 = \frac{1}{6}$. Подставляя это значение в (2), находим d = 0.200.

С учетом композиции нормальных сигналов [15] находим, что в сделанных предположениях распределение манхэттенской метрики на положительной полуоси может быть аппроксимировано следующим образом:

$$F(M_M) = 2\Phi\left(\frac{M_M}{\sqrt{D}}\right) - 1,$$

$$D = nd$$
(7)

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ – распределение Лапласа.

Таким образом, и в этом случае порог различения может быть сформирован по заданной вероятности ошибки первого рода. Использование евклидовой и манхэттенской метрик значительно упрощает проведение кластеризации в рое объектов. В принципе, ее проведение можно начинать с любого из них. К тому же классу при этом относят объекты, метрика которых относительно исходного меньше порога различения. Относительно отобранных объектов операция повторяется. В конечном итоге к классу относят все объекты из роя, метрика которых отличается от соседей менее, чем на величину порога различения. Процесс продолжается для объектов вне кластера до тех пор, пока они не будут отнесены к тому или иному классу. Настроечным параметром процесса является упомянутая выше вероятность ошибки первого рода, которая соответствует также вероятности некорректности кластеризации в целом.

ПРИМЕРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

Остановимся теперь на некоторых примерах формирования переменных различного типа. Как уже указывалось, в простейшем случае бинарная переменная отображает факт наличия или отсутствия того или иного признака или состояния номинальной переменной. В качестве примера формирования относительных переменных рассмотрим практически важный вопрос отображения в векторе признаков формы объекта в картинной плоскости. К такому отображению обычно предъявляется требование инвариантности по отношению к таким геометрическим преобразованиям как перенос, поворот и масштабирование [16].

Будем считать, что для формирования соответствующих инвариантов используется метод центральных моментов, рассчитанных относительно центра тяжести плоской фигуры, наблюдаемой в картинной плоскости. Для расчета моментов используется представление контура объекта в виде функции $r = r(\phi)$ в полярных координатах с полюсом в центре тяжести. Считается при этом, что полярный угол изменяется в интервале ($-\pi$, π), т.е. отсчитывается от отрицательной полуоси используемой системы координат в направлении против часовой стрелки. Первый нецентральный момент полярной функции рассчитывается в со-

ответствии с соотношением вида $R = \int_{-\pi}^{\pi} r(\phi) d\phi$. Он представляет собой радиус круга, который приближает контур наилучшим в среднем образом. В соответствии со стандартным подходом [8], второй центральный момент рассчитывается в соот-

ветствии с соотношением $\sigma^2 = \mu_2 = \int_{-\pi}^{\pi} (r(\varphi) - R)^2 d\varphi$. Он интерпретируется как дисперсия отклонения контура от круга наилучшего приближения. Асимметрия и эксцесс контура относительно этого круга также определяются стандартным образом:

$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3},$$
$$E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3,$$

где μ_3 , μ_4 — центральные моменты третьего и четвертого порядка.

Смысл нулевых значений асимметрии и эксцесса в данном случае следующий: контур в среднем симметричен относительно круга наилучшего приближения, а его отклонение от этого круга подчиняется нормальному закону. Инвариантность этих величин относительно упомянутых геометрических преобразований интуитивно очевидна, а методика расчета хорошо известна. Исходя из этих соображений, естественно именно их использовать в качестве относительных переменных, определяющих форму объекта в картинной плоскости. Заметим, что опыт подобного подхода в форме применения динамогенетических диаграмм "асимметрия—эксцесс" хорошо известен в гранулометрии [17].

Примером формирования порядковой переменной является оценка объема группы. Последняя представляет собой совокупность элементов источников импульсного сигнала [18]. Очевидно, что сопровождению элементов предшествует этап их селекции, включающий оценку объема группы. Предположим, что селекция и сопровождение элементов являются апостериорными, т.е. осуществляются после накопления массива первичных данных. В этом случае для оценки объема группы может быть использован гистограммный метод [19], базирующийся на предварительном построении гистограммы для длительности импульсов или для периодов их следования.

Гистограмма для периодов следования строится в ситуации идентичности длительностей импульсов для разных объектов. Построение осуществляется в предположении, что периоды следования импульсов от разных объектов приблизительно одинаковы и лишь смещены по времени. Отсюда следует, что порядок следования импульсов от разных объектов не меняется. Это



Рис. 1. Объединенные гистограммы.

предположение безусловно оправдано в случае активной локации, а также в некоторых ситуациях пассивной [20].

Особенность метода состоит в том, что гистограммы строятся для импульсов, разнесенных на заданное число номеров. При этом гистограммы, сформированные для пачек импульсов, объединялись и дальнейшая обработка осуществлялась над ними. В каждой объединенной гистограмме строились следующие вариации:

— относительно среднего момента прихода (фронта) импульса в пачке $v_{a\Delta}$;

— относительно максимальной моды в пачке $v_{t\Delta}$;

— относительно максимальной моды в стробе сопровождения $v_{\delta\Delta}$.

В качестве решающей функции для величины разнесения Δ использовалось произведение $s_{\Delta} = v_{a\Delta}v_{t\Delta}v_{\delta\Delta}$, а решающее правило состояло в выборе точки минимума s_{Δ} . Найденное значение Δ интерпретировалось как объем группы. Связано это было с тем, что минимальность s_{Δ} соответствует близости периодов следования исследуемых импульсов, т.е. их принадлежности одному объекту. Дополнительным преимуществом использования этой величины является ее инвари-

Таблица 1.	
------------	--

объекты	1	2	3	4	
параметры	1	2	5		
решающая функция	0.02517	0.017803	0.019035	0.031864	
смещение строба	3045	7574	101497	101503	
полуширина строба	6055.5	8328	6827.5	6827.5	

антность во времени, т.е. независимость от временного масштаба разностей.

На практике для реализации описанного выше подхода использовался массив накопленных данных, включающий:

 последовательность номеров импульсов в накопленном массиве;

 моменты регистрации передних и задних фронтов наблюдаемых импульсов;

- наблюдаемые амплитуды импульсов;

- наблюдаемые частоты.

Примеры объединенных гистограмм приведены на рис. 1, а значения решающих функций и параметров сопровождения — в табл. 1. Минимальное значение решающей функции имеет место для объема группы два элемента.

Проведенное рассмотрение показывает, что, в отсутствие пеленгационной информации, принятое предположение о близости периодов следования импульсов от разных элементов является необходимым и обеспечивает решение задачи селекции в этих условиях. Отказ от него делает селекцию невозможной и требует дополнения номенклатуры данных, например, сведениями о пеленгах наблюдаемых объектов.

выводы

1. В рамках распознавания образов выделяется процедура комплексирования данных, целью которой является идентификация объекта по совокупности признаков — стандартизированных показателей (параметров), определяющих образ объекта в условиях его системного окружения.

2. Образ объекта характеризуется положением в пространстве признаков, а задача идентификации эквивалентна привязке этого положения к соответствующей области, сформированной в ходе предварительной классификации. Последнюю предлагается осуществлять в ходе кластеризации имеющейся статистической выборки в ходе обучения без учителя.

3. Комплексирование данных в системах распределенного мониторинга порождает проблемы, связанные:

 – с объединением разнородных данных от различных источников, зачастую слабо связанных; противоречивостью, неполнотой и неточностью данных в отсутствие априорной идентификации наблюдаемых объектов;

 требованием оперативной обработки большого объема разнородной информации.

4. В качестве основы для комплексирования используется функциональное шкалирование. В рамках последнего развиваются методы, предназначенные для формирования обобщенных показателей в составе объединенного вектора признаков. Номинальным признакам при этом сопоставляются бинарные показатели, порядковым — целочисленные, относительным — вещественные. Предварительная нормировка позволяет свести эти показатели к одному диапазону.

5. Возможными мерами близости в пространстве признаков являются коэффициент корреляции по Пирсону, информационная метрика, а также евклидова и манхэттенская метрики. Ценность первых двух мер ограничена, поскольку они не охватывают все типы показателей в составе объединенного вектора признаков. В то же время евклидова и манхэттенская метрики имеют установленные статистические распределения. Это позволяет формировать порог различения естественным образом — по заданной вероятности ошибки первого рода на основе критерия Неймана—Пирсона. Это обстоятельство обуславливает их предпочтительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Моисеев А.А.* Модификация некоторых процедур автоматического анализа данных // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 2. С. 48–53.
- 2. *Моисеев А.А.* Оценка параметров наблюдения методом редукции // Радиопромышленность. 2017. № 3. С. 19–25.
- 3. *Бекенева Я.А*. Преобразование данных от разнородных систем мониторинга. Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 2. С. 197–206.
- 4. *Torgerson W.* Theory and methods of scaling. NY.: Wiley, 1958. 460 p.
- 5. *Diday E.* Optimisationen classification automatique et reconnaissance des forms // Operations Research, 1972. V. 6. № V3. P. 61–95.
- 6. Statistical methods for digital computers. ed. by Enslein K. ea. N.Y.: Wiley, 1977. 464 p.

277

- 7. *Gray M*. Entropy and information theory. NY.: Springer, 2007. 289 p.
- 8. *Wilks S.* Mathematical statistics. NY.: Wiley, 1962. 644 p.
- 9. *Моисеев А.А.* Параметрическая дискриминация// Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19. № 4. С. 20–22.
- 10. *Lindley D., Scott W.* New Cambridge statistical tables. Cambridge: Cambridge university press. 1995. 96 p.
- 11. Handbook of mathematical functions.ed. by Abramovitz M., National bureau of standards. 1964. 1046 p.
- 12. Empirical process techniques for dependent data.ed. by Dehling H. ea., Boston.: Birkhauser, 2002. 383 p.
- 13. *Sidnyaev N., Andreytseva K.* Independence of the Residual Quadratic Sums in the Dispersion Equation with Noncentral χ2-Distribution // Applied Mathematics. 2011. V. 2. № 10. P. 1303–1308.

- Siegel A. Practical business statistics. NY.: McGraw Hill, 2000. 640 p.
- 15. *Kallenberg O.* Foundations of modern probability. NY.: Springer, 2002. 650 p.
- 16. *Mardia K.* Statistic analysis of directional data. NY.: Academic press.: 1972. 389 p.
- 17. *Passega R., Byramjee R.* Grain-size image of clastic deposits// Sedimentology, 1969. V. 13. № 3–4. P. 233–252.
- 18. *Моисеев А.А.* Апостериорное сопровождение элементов групповой цели // Радиопромышленность. 2020. Т. 30. № 2. С. 25–31.
- 19. *Lancaster H.* An introduction to medical statistics. N.Y.: Wiley, 1974. 305 p.
- 20. *Scolnik M.* Radar handbook. N.Y.: McGraw–Hill, 2008. 1352 p.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 270-278

Data Fusion Method in a Distributed Monitoring System

A. A. Moiseev#

Research and Production Enterprise Radio Monitoring Technologies and Systems, Mytishchi, 141002 Russia [#]e-mail: slow.coach@yandex.ru Received January 28, 2020; revised March 26, 2020; accepted September 8, 2020

Abstract—Modern distributed monitoring systems include observation and detection devices of different types. Heterogeneity of corresponding data creates problems associated with such data unification, with inconsistency, deficiency, and inaccuracy of data, as well as with necessity of big information volume processing. Algorithms providing heterogeneous data fusion for convenient representation of last ones, for getting reliable conclusions, and for decision making are considered in this work. The proposed approach to heterogeneous data fusion based on associate index vector application and data fusion realization on unified formal base. Start attempts of such base creation are quite justified. In this field, the approach based on transfer from original indices to generalized ones is developed. The aims of the generalized index processing methods are as follows: (i) reduction of the vector dimension, (ii) rational index nominalization, (iii) object classification without teaching, (iv) statistical analysis of classification efficiency.

For the representation of indices, nominal (binary), ordinal (integer), and relative (real) variables normalized in range (0, 1) are used. It is demonstrated that the advantage of Euclidian and Manhattan metrics is the possibility of forming the diversity threshold based on the Neyman–Pearson criterion. Examples of indices of different types and their application are also presented.

Keywords: distributed monitoring, heterogeneous data, data fusion, functional scaling, Euclidian metric, Manhattan metric, Neyman–Pearson criterion

DOI: 10.1134/S2304487X20030062

REFERENCES

- Moiseev A. Modifikatsiya nekotorych protsedur avtomaticheskogo analiza dannych [Some procedures modification of automatic data analysis] // H&ES (Russia), 2017. vol. 9. no. 2. pp. 48–53 (in Russian).
- 2. Moiseev A. Otsenka parametrov nablyudeniya metodom reduktsii Evaluation of observation parameters

by reduction method] // Radio industry (Russia), 2017. no. 3. pp. 19–25 (in Russian).

- Bekeneva Ya. Preobrazovaniye dannykh ot raznorodnykh system monitoringa [Data conversion from heterogeneous systems of monitoring] // Program products and systems. 2019. vol. 32. no. 2. pp. 197–206 (in Russian).
- 4. Torgerson W. Theory and methods of scaling. NY.: Wiley, 1958. 460 pp.

- Diday E. Optimisationen classification automatiqueet reconnaissance des forms // Operations Research. 1972. vol. 6. no. V3, pp. 61–95.
- 6. Statistical methods for digital computers. ed. by Enslein K. ea. NY.: Wiley, 1977. 464 p.
- 7. Gray M. Entropy and information theory. NY.: Springer, 2007. 289 p.
- 8. Wilks S. Mathematical statistics. NY.: Wiley, 1962. 644 p.
- Moiseev A. Parametricheskaya diskriminatsiya [Parametrical discrimination] // Science intensive technologies (Russia), vol. 19. N 4. 2018. pp. 20–22 (in Russian).
- 10. Lindley D., Scott W. New Cambridge statistical tables. Cambridge: Cambridge university press, 1995. 96 pp.
- 11. Handbook of mathematical functions. ed. by Abramovitz M., National bureau of standards. 1964. 1046 p
- 12. Empirical process techniques for dependent data. ed. by Dehling H. ea., Boston.: Birkhauser, 2002. 383 pp.

- Sidnyaev N., Andreytseva K. Independence of the Residual Quadratic Sums in the Dispersion Equation with Noncentral χ2-Distribution // Applied Mathematics. 2011, vol. 2. no. 10. pp. 1303–1308.
- Siegel A. Practical business statistics. NY.: McGraw Hill, 2000. 640 pp.
- 15. Kallenberg O. Foundations of modern probability. NY.: Springer, 2002. 650 pp.
- 16. Mardia K. Statistic analysis of directional data. NY.: Academic press, 1972. 389 pp.
- Passega R., Byramjee R. Grain-size image of clastic deposits // Sedimentology. 1969, v. 13, N 3–4, p. 233– 252.
- Moiseev A.A. Posterior tracking of multiple target elements. Radio industry (Russia), 2020, vol. 30, no. 2, pp. 25–31 (in Russian).
- 19. Lancaster H. An introduction to medical statistics. NY.: Wiley, 1974. 305 pp.
- 20. Scolnik M. Radar handbook. NY.: McGraw–Hill, 2008. 1352 pp.

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2020, том 9, № 3, с. 279–288

_ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА _____ И ИНФОРМАТИКА

УДК 004.91

КОМПЛЕКСНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТОНАЛЬНО-ЭМОТИВНОГО АНАЛИЗА ТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ

© 2020 г. А. В. Наумов^{1,*}, А. А. Селиванов^{1,**}, И. А. Молошников^{1,***}, А. Г. Сбоев^{1,2,****}

¹ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, 123182, Россия ² Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409, Россия

> *e-mail: sanya.naumov@gmail.com **e-mail: aaselivanov.10.03@gmail.com ***e-mail: dmitrygagus@gmail.com ***e-mail: sag111@mail.ru Поступила в редакцию 23.06.2020 г. После доработки 30.06.2020 г. Принята к публикации 08.09.2020 г.

В работе представлен инструмент для комплексного тематического, аспектно-тонального и эмотивного анализа текстовых данных написанных на естественном языке. Для тематического анализа применяется метод на базе вероятностно-энтропийных характеристик, позволяющий автоматически определять количество тематик в текстовой коллекции. Аспектно-тональный анализ реализуется на базе нейросетевой модели сложной топологии – интерактивной сети внимания. Апробация модели на корпусе соревнования SentiRuEval-2015 продемонстрировала точность 0.58 по метрике fl-macro, что выше по сравнению с существующими результатами. Для проведения эмотивного анализа создан метод на базе контекстно-зависимых векторных представлений слов с последующей обработкой ансамблевым классификатором. Обучение проводилось на специально подготовленном корпусе предложений для 5 базовых эмоций (радость, грусть, злость, страх и удивление). Предложения для корпуса собраны из различных типов текстов и размечены средствами краудсорсинга. Точность метода составила 0.76 по метрике fl-macro. В статье также продемонстрирован пример использования выбранного комплекса инструментов. Для анализа выбраны тексты социальной сети LiveJournal и новостей из проекта SCTM-гu. Представлена визуализация результатов анализа текстов в виде графов, которая показывает эффективность созданного комплекса инструментов.

Ключевые слова: анализ данных, текстовые данные, обработка естественного языка, аспектный сентимент анализ, выделение эмоций, нейронные сети, машинное обучение **DOI:** 10.1134/S2304487X20030086

1. ВВЕДЕНИЕ

Рост количества открытой информации в интернет-среде вызывает потребность развития автоматизированных инструментов ее разноуровневого анализа. Одним из ключевых видов информации при этом являются тексты на естественном языке, в анализе которых заинтересованы специалисты и аналитики различных предметных областей, в том числе: социологии, психологии, криминалистики, политологии, лингвистики, конфликтологии, которым необходимы решения для анализа потоков документов, способные извлекать признаки тонально-эмотивного отношения людей к различным тематикам и объектам.

На текущий момент известны несколько систем комплексного анализа данных, в том числе: IBM Watson Explorer, iFORA, Семантический архив [1–3]. Они представляют решения для информационного поиска, определения именованных сущностей, инструментов работы с тематиками и фактами. Однако комплексных систем текстового анализа, позволяющих оценить не только тональную составляющую текста, но и выраженную в нем эмотивную реакцию автора, в литературе не представлено.

Наиболее перспективными методами для решения задач аспектно-тонального анализа (когда тональность определения для пары: аспект—контекст) являются нейросетевые методы с различными механизмами внимания [4, 5] и векторными представлениями слов [6, 7]. Аспектом в данном случае может быть заранее заданный объект в виде фразы из текста или определенной категории. Что касается определения эмоций автора в тексте, то для корпусов на иностранных языках, наилучшие результаты показывают ансамбли методов машинного обучения в совокупности с век-



Рис. 1. Общая схема комплексного инструмента тонально-эмотивного анализа. На рисунке использованы следующие аббревиатуры: ИС – именованная сущность, КСиС – ключевые слова и словосочетания.

торными представлениями слов [8, 9] и словарями эмотивной лексики [10, 11]. Для русского языка отсутствуют достаточные наборы размеченных примеров для задачи определения эмоций, что является дополнительной трудностью.

В связи с этим целью данной работы является разработка комплексного инструмента для автоматизированного тонально-эмотивного анализа текстов заданной тематической направленности. Предлагаемый инструмент включает в себя алгоритмы: а) вероятностно-энтропийного анализа текстов для выделения тематик, б) аспектного анализа тональности, на основе глубокой нейронной сети с вниманием, где в качестве аспектов рассматриваются именованные сущности категорий Персона\Локация\Организация, в) эмотивного анализа с выделением эмоций автора, выраженных в тексте, с помощью моделей машинного обучения, а также г) средств визуализации результатов в виде аспектно-тональных семантических графов.

2. ВЫБРАННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ АНАЛИЗА ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ

2.1. Этапы обработки текстовых данных

Описание предложенной методики автоматизированного тонально-эмотивного анализа текстов заданной тематической направленности, написанных на естественном языке, представлено на рис. 1.

2.2. Предобработка текстовых данных

Исходный набор данных преобразуется в необходимый формат путем нескольких процедур: выбор коллекции документов, очистка текста от тегов разметки и других бессмысленных выражений, разбиение текста на отдельные слова и предложения, а также определение леммы для каждого слова.

Коллекция документов формируется в зависимости от задачи на основе текстов, выбранных для анализа. Например, это могут быть документы определенной тематики, или документы содержащие определенные слова.

Очистка текста происходит с помощью регулярных выражений. При этом удаляются html-тэги и адреса сайтов.

Очищенный текст разбивается на слова и предложения с помощью библиотеки с открытым исходным кодом UDpipe¹ для обработки текстов на естественном языке, которая является универсальной, с поддержкой многих языков (в т.ч. русского) и показывающей высокие результаты в сравнении с другими подобными средствами [12]. Точность лемматизации, выделения слов и предложений для русского языка составляет 96.6%, 99.7% и 98.8%² соответственно на корпусе Син-ТагРус.

¹ Сайт библиотеки – http://ufal.mff.cuni.cz/udpipe

² Модель 2.5: http://ufal.mff.cuni.cz/udpipe/models#universal_dependencies_25_models_description

2.3. Тематический анализ

Подготовленные на предыдущем этапе документы анализируются на предмет выделения тематических кластеров и извлечения именованных сущностей.

Для выделения тематических кластеров был выбран вероятностно-энтропийный подход, описанный в работе [13], основанный на широком наборе энтропийных характеристик текста. сочетающем в себе различные распределения слов в коллекции, как TF-IDF, дивергенция Кульбака-Лейблера, информационной энтропии, семантического алгоритма Гинзбурга и т.д., с последующей кластеризацией на базе аффинного преобразования. При этом тематика характеризуется набором ключевых слов и словосочетаний с указанием их значимости. На их основе осуществляется поиск наиболее релевантных документов относительно заданной тематической эталонной коллекции. Метод позволяет анализировать коллекцию текстов без начального указания количества тематик. что является существенным для создаваемого нами решения. Подход состоит из следующих этапов:

1) Фильтрация стоп-слов. Здесь собраны наиболее часто употребляемые слова (союзы, предлоги, местоимения и др).

2) Расчет характеристик и весов слов\словосочетаний в документе на базе вероятностно-энтропийного метода, основанного на дивергенции Кульбака—Лейблера, энтропийных признаках, модели случайного распределения Бернулли и др. [14].

3) Кластеризация с использованием аффинного преобразования. Из ключевых биграмм строится матрица смежности, описывающая связи между словами в рамках предложения. К этой матрице применяется метод кластеризации на основе близости узлов через соседей (метод аффинного преобразования — Affinity Propagation [15], используя библиотеку scikit-learn [16]), результатом работы алгоритма является набор тематических кластеров, представленных взвешенными ключевыми словами и словосочетаниями.

2.4. Аспектно-тональный анализ

Для разработки метода оценки тональности в составе методики за основу взята архитектура модели нейросети IAN, которая показала хорошие результаты в задаче аспектно-тонального анализа текстов на английском языке [17]. Архитектура модели для определения тональности аспектов текста, состоит из 2 частей, формирующих отдельные представления для целевого объекта (аспекта) и его контекста в интерактивном режиме. Одна из частей сети обрабатывает контекст для рассматриваемого аспекта, в другой обрабатываются слова самого аспекта.

В нашей модели аспектом являются слова принадлежащие одной именованной сущности, для которой определяется тональность (1), а контекст содержит в себе слова предложения, содержащего рассматриваемую именованную сущность (2).

$$target = [w_t^1, w_t^2, \dots, w_t^N],$$
 (1)

$$context = [w_c^1, w_c^2, ..., w_c^M],$$
 (2)

где N — количество слов целевого аспекта, M — количество слов в предложении, содержащем целевой аспект.

Извлечение именованных сущностей производится с помощью модели нейронной сети из библиотеки DeepPavlov³, основанной на топологии BERT [18]. Модель предварительно обучалась на русскоязычной части Википедии и новостных данных [19] с дальнейшим обучением на корпусе Collection3 [20]. Точность модели по метрике f1-score составляет 0.98%, что является одним из state-ofthe-art решений для русского языка. В данной работе используются следующие категории сущностей: Персоны, Организации, Локации.

Слова выделенных контекста и аспекта преобразуются в вектора с использованием языковой модели ELMo [6], обученной на корпусе Википедии. Полученные векторные представления слов аспекта и контекста подаются в рекуррентную нейронную сеть на базе LSTM слоев [21] для получения соответствующих скрытых состояний слов. После этого, их средние значения используются для генерации векторов внимания. Далее внутренние представления целевого объекта и контекста объединяются и полученный вектор подается на полносвязный слой с активационной функцией softmax для итогового класса тональности. Схема архитектуры предложенной модели представлена на рис. 2.

Благодаря такой реализации механизма внимания, целевой объект и контекст могут влиять на формирование своих внутренних представлений в интерактивном режиме.

Разработанный метод показал лучшие точности по сравнению с другими решениями при тестировании в задаче аспектно-тонального анализа на корпусе, собранном для соревнования SentiRuEval-2015 [22] (см. табл. 1).

Проведенные эксперименты показали, что использование модели векторного представления слов на базе ELMo для векторизации аспекта и контекста в рамках нейросетевой архитектуры типа IAN позволяет получать более высокие точ-

³ Модель "ner_rus_bert": http://docs.deeppavlov.ai/en/master/features/models/ner.html



Рис. 2. Архитектура предложенной модели на базе IAN.



Рис. 3. Архитектура разработанного ансамблевого классификатора эмоций.

ности в задаче аспектной тональности по сравнению с другими реализациями.

2.5. Эмотивный анализ

Для эмотивного анализа на русском языке отсутствуют готовые алгоритмы и размеченные наборы данных, поэтому для реализации функционала эмотивного анализа создан метод на базе контекстно-зависимых векторных представлений слов и последующей обработкой ансамблевым классификатором, обученным на специально подготовленном корпусе текстовых данных для 5 базовых эмоций (радость, грусть, злость, страх и удивление). Корпус состоит из 7235 предложений из постов социальной сети "Живой Журнал" [24], текстов новостного интернет-издания "Лента. Ру"⁴ и сообщений микроблога "Твиттер" [25]. Для разметки использовалась краудсорсинговая платформа, где аннотаторам предлагалось оценить предварительно отобранные

русского языка⁵.

в табл. 2.

став ансамбля входят несколько моделей⁶, в том числе: машина опорных векторов с линейным ядром, градиентный бустинг и решающие деревья (см. рис. 3).

предложения, которые включают слова из слова-

рей: а) оценочных слов и выражений русского

языка РvСентиЛекс [26] и б) эмотивной лексики

Статистика собранного корпуса представлена

Для реализации классификатора эмоций нами

проведены сравнительные эксперименты мето-

дов машинного обучения, среди которых лучшую

При обучении на 80% корпуса и тестировании на 20% разработанный метод показал точность

ой ансамблена специальовых данных данков, полученных из модели векторного представления слов ELMo. В со-

⁵ Словарь эмотивной лексики русского языка: https://lexrus.ru/default.aspx?p=2876

⁴ Корпус текстов издания Лента. Ру: https://github.com/yutkin/Lenta. Ru-News-Dataset

⁶ Для расчета моделей и метрик используется библиотека scikit-learn: https://scikit-learn.org/

КОМПЛЕКСНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

	Отзывы по а	втомобилям	Отзывы по ресторанам		
	f1-micro	f1-macro	f1-micro	f1-macro	
SentiRuEval-2015 — базовая модель [22]	0.62	0.26	0.71	0.27	
SentiRuEval-2015 – лучшая модель [23]	0.74	0.57	0.82	0.55	
Предложенная модель	0.79	0.60	0.85	0.58	

Таблица 1. Полученные точности решения задачи аспектно-тонального анализа

Таблица 2. Статистика собранного корпуса текстов по 5 эмоциям

	Радость	Грусть	Страх	Злость	Удивление	Всего
Живой Журнал	316	222	208	174	323	1243
Лента. Ру	153	65	106	102	166	592
Твиттер	1010	1114	251	156	175	2706
Всего	1479	1401	565	432	664	4541

Таблица 3. Результаты сравнительных экспериментов для классификации эмоций (fl-macro)

	Радость	Грусть	Страх	Злость	Удивление	Среднее
Случайный выбор метки	0.45	0.45	0.4	0.38	0.39	0.41
Машина опорных векторов (SVM) на признаках TF-IDF по <i>n</i> -граммам символов (от 4 до 8)	0.67	0.69	0.64	0.52	0.68	0.64
Словари эмотивной лексики	0.68	0.64	0.68	0.65	0.67	0.66
Наш подход	0.88	0.83	0.77	0.67	0.74	0.78

выше на 0.37, 0.14 и 0.12 для случайного выбора, базового классификатора на SVM и словарного метода, соответственно (см. табл. 3).

3. ПРИМЕР ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА

В этой главе приводится пример использования сформированного комплекса инструментов для анализа текстовых данных. Для экспериментов по выделению тематических кластеров были выбраны 2 источника: социальные сети и новостные ресурсы. В качестве данных из социальных сетей был взят имеющийся корпус постов из "Живого Журнала", а в качестве новостного источника был рассмотрен русскоязычный корпус текстов SCTM-ru [27] с открытой лицензией, в котором использованы статьи международного новостного сайта "Русские Викиновости". Корпус содержит в себе 7 тыс. документов, 185 авторов и почти 12 тыс. уникальных тематических категорий.

Чтобы в заданных источниках выбрать похожие документы и выделить в них тематики, для задания изначальной анализируемой темы, из "Живого Журнала" была выбрана эталонная коллекция из 10 документов со схожей темой "выборы в Москве". После этого выделялись ключевые слова и словосочетания, которые использовались для поиска похожих документов в заданных источниках. Документ считался похожим, если в нем присутствовало больше 2 ключевых словосочетаний и 15 ключевых слов. В итоговую коллекцию попало 47 документов из новостного источника и 40 из социальных сетей.

В найденных документах снова выделялись ключевые слова и словосочетания, а также определялись тематики. Автоматически выделено 49 наиболее представленных тематик, а в топ 5 наиболее значимых ключевых слов вошли: "кандидат", "выборы", "Россия", "партия", "избиратель".

Для представления результатов выделения тематических кластеров проводится визуализация в виде графа, узлами которого являются выделенные ключевые слова, а связи отражают встречаемость ключевых слов в ключевой биграмме. Размер узлов зависит от рассчитанного веса ключевого слова. Чем вес слова больше, тем оно важнее для тематики, а узел крупнее. Слова из одной тематики имеют один и тот же цвет. Толщина связи между словами зависит от частоты встречаемости рассматриваемого словосочетания в рассматриваемой коллекции документов. Цвета отражают принадлежность к тематическим кластерам.



Рис. 4. Граф кластеров (овалы) самых представительных тематик.



Рис. 5. Диаграмма распределения упоминаний Персон, Организаций и Локаций в тональных контекстах для социальных сетей (слева) и новостей (справа).

Графическое представление графа реализовано с использованием графического редактора Gephi [28]. Для укладки графа используется алгоритм ForceAtlas 2 [29]. В качестве настраиваемых параметров используется коэффициент отталкивания между узлами, со значением 5, гравитация, которая не дает узлам сильно разлетаться, со значением 2, а также включенный запрет перекрытия, чтобы узлы не загораживали друг друга. Пример визуализированного графа выделенных тематик представлен на рис. 4. Далее для выбранной коллекции документов был проведен эмотивнотональный анализ с выделением именованных сущностей. В топ 5 наиболее часто встречаемых ключевых слов и именованных сущностей среди новостей вошли: *"выборы"*, *"Россия"*, *"партия"*, *"голос"*, *"кандидат"*; а среди социальных сетей: *"кандидат"*, *"выборы"*, *"партия"*, *"избиратель"*, *"депутат"*.

Визуализация результатов аспектно-тонального анализа для выделенных именованных сущностей, наиболее часто упоминаемых в позитивном и негативном ключе, представлена на рис. 5.

Из рисунка видно, что в новостных текстах количество упоминаний в разных коннотациях распределено более равномерно, в то время как в со-



Рис. 6. Тематические кластеры для предложений в позитивной тональности из новостного источника (слева) и из социальной сети (справа).



Рис. 7. Диаграмма распределения упоминаний Персон, Организаций и Локаций в различных эмоциях для социальных сетей (слева) и новостей (справа).

циальных сетях контекст зачастую более негативный.

На рис. 6 представлены аспектно-тональные семантические графы тематик для позитивного контекста, выделенных именованных сущностей, из новостей и социальных сетей, соответственно. При этом слова документа, принадлежащие одной именованной сущности, рассматриваются при тематическом анализе как одно слово. Например, слова сущности "Иван Иванович" анализируются как одно слово "Иван_Иванович".

Визуализация результатов анализа эмотивности выбранных данных (см. рис. 7) позволяет сравнить новостные тексты, где авторы стараются не закладывать эмоции страха и злости в тексты своих публикаций, транслировать в основном позитивную повестку или информировать о необычных событиях, с текстами в социальных сетях, где авторы часто пишут со злостью или негодованием.

Таким образом, предложенный набор инструментов позволяет проводить анализ массива текстовых данных с определением тематик и эмотивно-тональных оценок.

4. ВЫВОДЫ

На базе проведенного исследования разработан инструмент комплексного тематического, аспектно-тонального и эмотивного анализа русскоязычных текстовых данных по апробации и разработке методов интеллектуального анализа данных. В состав комплекса включены разработанные и адаптированные средства для тематической кластеризации, аспектно-тонального анализа и выделения эмоций из авторского текста. Отличительной особенностью разработанного комплекса является возможность проводить автоматизированный тонально-эмотивный анализ текстов с выделением представленных в них тематик. Апробирование комплекса продемонстрировало его эффективность по рассматриваемому набору видов анализа.

5. ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00398 и с использованием оборудования центра коллективного пользования "Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса" НИЦ "Курчатовский институт", http://ckp.nrcki.ru/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- IBM Watson Explorer. Available at: https://www.ibm.com/products/watson-explorer (accessed: 14.03.2020).
- iFORA. Available at: https://issek.hse.ru/news/254274661.html (accessed: 14.03.2020).
- 3. Semantic Archive Platform. Available at: http://www.anbr.ru/ (accessed: 14.03.2020).
- Ma D. et al. Interactive attention networks for aspectlevel sentiment classification. arXiv preprint arXiv:1709.00893. 2017.
- Huang B., Ou Y., Carley K.M. Aspect level sentiment classification with attention-over-attention neural networks. International Conference on Social Computing, Behavioral-Cultural Modeling and Prediction and Behavior Representation in Modeling and Simulation. Springer, Cham, 2018. P. 197–206.
- 6. *Peters M. E. et al.* Deep contextualized word representations. *arXiv preprint* arXiv:1802.05365. 2018.
- Pennington J., Socher R., Manning C. Glove: Global vectors for word representation. Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP). 2014. C. 1532–1543.
- 8. *Duppada V., Jain R., Hiray S.* Seernet at semeval-2018 task 1: Domain adaptation for affect in tweets. *arXiv preprint* arXiv:1804.06137. 2018.
- 9. *Jabreel M., Moreno A.* EiTAKA at SemEval-2018 Task 1: An ensemble of n-channels ConvNet and XGboost regressors for emotion analysis of tweets. *arXiv preprint* arXiv:1802.09233. 2018.
- 10. Mohammad S., Kiritchenko S. Understanding emotions: A dataset of tweets to study interactions between affect categories. Proceedings of the Eleventh International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2018). 2018.
- 11. *Mohammad S.M., Bravo-Marquez F.* Emotion intensities in tweets. *arXiv preprint* arXiv:1708.03696. 2017.
- Straka M., Straková J. Tokenizing, pos tagging, lemmatizing and parsing ud 2.0 with udpipe. Proceedings of the CoNLL 2017 Shared Task: Multilingual Parsing from Raw Text to Universal Dependencies. 2017. P. 88–99.
- 13. *Moloshnikov I.A. et al.* A probabilistic-entropy approach of finding thematically similar documents with creating context-semantic graph for investigating evolution of society opinion. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2016. V. 681. № 1. P. 012012.
- 14. Moloshnikov I.A., Sboev A.G., Rybka R.B., & Gydovskikh D.V. An algorithm of finding thematically similar documents with creating context-semantic

graph based on probabilistic-entropy approach. *Procedia Computer Science*, 2015. № 66. P. 297–306.

- Frey B.J., Dueck D. Clustering by passing messages between data points. Science. 2007. V. 315. № 5814. P. 972–976.
- 16. *Pedregosa F, Varoquaux u ∂p.*, "Scikit-learn: Machine Learning in Python", *Journal of Machine Learning Research*. 2011. № 12. C. 2825–2830.
- 17. *Ma D. et al.* Interactive attention networks for aspectlevel sentiment classification. *arXiv preprint* arXiv:1709.00893. 2017.
- 18. *Devlin J. et al.* Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *arXiv preprint* arXiv:1810.04805. 2018.
- 19. *Kuratov Y., Arkhipov M.* Adaptation of Deep Bidirectional Multilingual Transformers for Russian Language. *arXiv preprint* arXiv:1905.07213. 2019.
- Mozharova V., Loukachevitch N. Two-stage approach in Russian named entity recognition. International FRUCT Conference on Intelligence, Social Media and Web, ISMW FRUCT 2016. Saint-Petersburg; Russian Federation, https://doi.org/10.1109/FRUCT.2016.7584769
- 21. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. Neural computation. 1997. T. 9. № 8. C. 1735–1780.
- Loukachevitch N., Blinov P., Kotelnikov E., Rubtsova Y., Ivanov V., & Tutubalina E. SentiRuEval: testing objectoriented sentiment analysis systems in Russian. In Proceedings of International Conference Dialog. 2015. V. 2. P. 3–13.
- Blinov P., Kotelnikov E.V. Semantic similarity for aspect-based sentiment analysis. Russian Digital Libraries Journal. 2015. T. 18. № 3–4. C. 120–137.
- 24. Rusprofiling corpus of russian texts. Available at http://rusprofilinglab.ru/rusprofiling-atpan/corpus/ (accessed: 14.03.2020)
- 25. Rubtsova Y. Avtomaticheskoe postroenie i analiz korpusa korotkih tekstov (postov mikroblogov) dlja zadachi razrabotki i trenirovki tonovogo klassifikatora [Automatic construction and analysis of the short texts dataset (microblogging posts) for the task of developing and training sentiment classifier]. Inzhenerija znanij i tehnologii semanticheskogo veba. 2012. T. 1. C. 109–116.
- 26. *Loukachevitch N., Levchik A.* Creating a general russian sentiment lexicon. Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'16). 2016.
- 27. *Karpovich S.N.* The Russian language text corpus for testing algorithms of topic model. *SPIIRAS Proceedings.* 2015. T. 39. C. 123–142.
- Bastian M., Heymann S., Jacomy M. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. Third international AAAI conference on weblogs and social media. 2009.
- 29. *Jacomy M. et al.* ForceAtlas2, a continuous graph layout algorithm for handy network visualization designed for the Gephi software. *PloS one.* 2014. № 6. T. 9. P. e98679.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 3, pp. 279-288

Method for Automated Intelligent Emotive and Sentiment Analysis of Texts with a Thematic Focus

A. V. Naumov^{*a*,#}, A. A. Selivanov^{*a*,##}, I. A. Moloshnikov^{*a*,###}, and A. G. Sboev^{*a*,*b*,####}

^a National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

^b National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia [#]e-mail: sanya.naumov@gmail.com, dmitrygagus@gmail.com

##e-mail: aaselivanov. 10.03@gmail.com

###e-mail: ivan-rus@yandex.ru

####e-mail: sag111@mail.ru

Received June 23, 2020; revised June 30, 2020; accepted September 8, 2020

Abstract—A tool for complex thematic, tonal, aspect-sentiment, and emotive analysis of natural-language texts is reported. For thematic analysis, a method based on probabilistic-entropy characteristics is employed, which allows us to identify automatically the number of topics in a text collection. Aspect-based sentiment analysis is performed within the neural network model with the topology of an interactive attention network, which demonstrates an accuracy of 0.58 by F1-macro score on the corpus from the SentiRuEval-2015 competition, thus outperforming the best results of the competition. For conducting emotive analysis, a method is developed on the basis of context-dependent vector representations of words, with the subsequent processing by an ensemble classifier trained on a corpus of texts prepared specially for five basic emotions: joy, sadness, anger, fear, and surprise (this classifier achieving an accuracy of 0.76 by F1-macro). An example of using the method is also demonstrated. Texts of the LiveJournal social network and news from the SCTM-ru project are selected for analysis. Presented visualization of text analysis results in the form of graphs, which shows the efficiency of the developed method.

Keywords: data analysis, text data, natural language processing, aspect-based sentiment analysis, emotion recognition, neural networks, machine learning

DOI: 10.1134/S2304487X20030086

REFERENCES

- IBM Watson Explorer. Available at: https://www.ibm.com/products/watson-explorer (accessed: 14.03.2020).
- iFORA. Available at: https://issek.hse.ru/news/254274661.html (accessed: 14.03.2020).
- 3. Semantic Archive Platform. Available at: http://www.anbr.ru/ (accessed: 14.03.2020).
- Ma D. et al. Interactive attention networks for aspectlevel sentiment classification. *arXiv preprint* arXiv:1709.00893. 2017.
- Huang B., Ou Y., Carley K.M. Aspect level sentiment classification with attention-over-attention neural networks. *International Conference on Social Computing, Behavioral-Cultural Modeling and Prediction and Behavior Representation in Modeling and Simulation. Springer, Cham,* 2018. pp. 197–206.
- 6. Peters M.E. et al. Deep contextualized word representations. *arXiv preprint* arXiv:1802.05365. 2018.
- 7. Pennington J., Socher R., Manning C. Glove: Global vectors for word representation. *Proceedings of the 2014*

conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP). 2014. C. 1532–1543.

- 8. Duppada V., Jain R., Hiray S. Seernet at semeval-2018 task 1: Domain adaptation for affect in tweets. *arXiv preprint* arXiv:1804.06137. 2018.
- 9. Jabreel M., Moreno A. EiTAKA at SemEval-2018 Task 1: An ensemble of n-channels ConvNet and XGboost regressors for emotion analysis of tweets. *arXiv preprint* arXiv:1802.09233. 2018.
- 10. Mohammad S., Kiritchenko S. Understanding emotions: A dataset of tweets to study interactions between affect categories. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Language Resources and Evaluation* (*LREC 2018*). 2018.
- 11. Mohammad S.M., Bravo-Marquez F. Emotion intensities in tweets. *arXiv preprint* arXiv:1708.03696. 2017.
- Straka M., Straková J. Tokenizing, pos tagging, lemmatizing and parsing ud 2.0 with udpipe. Proceedings of the CoNLL 2017 Shared Task: Multilingual Parsing from Raw Text to Universal Dependencies. 2017. pp. 88–99.
- 13. Moloshnikov I.A. et al. A probabilistic-entropy approach of finding thematically similar documents with creating context-semantic graph for investigating evo-

lution of society opinion. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2016. № 1. T. 681. p. 012012.

- 14. Moloshnikov I.A., Sboev A.G., Rybka R.B., & Gydovskikh D.V.. An algorithm of finding thematically similar documents with creating context-semantic graph based on probabilistic-entropy approach. *Procedia Computer Science*, 2015. №66. pp. 297–306.
- 15. Frey B.J., Dueck D. Clustering by passing messages between data points. *Science*. 2007. № 5814. vol. 315. pp. 972–976.
- 16. Pedregosa F. and Varoquaux и др., "Scikit-learn: Machine Learning in Python", *Journal of Machine Learning Research*, 2011, № 12, pp. 2825–2830.
- 17. Ma D. et al. Interactive attention networks for aspectlevel sentiment classification. *arXiv preprint* arXiv:1709.00893. 2017.
- Devlin J. et al. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *arXiv preprint* arXiv:1810.04805. 2018.
- Kuratov Y., Arkhipov M. Adaptation of Deep Bidirectional Multilingual Transformers for Russian Language. *arXiv preprint* arXiv:1905.07213. 2019.
- Mozharova V., Loukachevitch N., Two-stage approach in Russian named entity recognition. *International FRUCT Conference on Intelligence, Social Media and Web, ISMW FRUCT 2016.* Saint-Petersburg; Russian Federation, DOI 10.1109/FRUCT.2016.7584769
- Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation*. 1997. T. 9. № 8. C. 1735–1780.
- 22. Loukachevitch, N., Blinov, P., Kotelnikov, E., Rubtsova, Y., Ivanov, V., & Tutubalina, E. SentiRuEval: test-

ing object-oriented sentiment analysis systems in Russian. In *Proceedings of International Conference Dialog.* 2015. Vol. 2, pp. 3–13.

- 23. Blinov P., Kotelnikov E.V. Semantic similarity for aspect-based sentiment analysis. *Russian Digital Libraries Journal*. 2015. T. 18. № 3–4. C. 120–137.
- 24. Rusprofiling corpus of russian texts. Available at http://rusprofilinglab.ru/rusprofiling-atpan/corpus/ (accessed: 14.03.2020)
- 25. Rubtsova Y. Avtomaticheskoe postroenie i analiz korpusa korotkih tekstov (postov mikroblogov) dlja zadachi razrabotki i trenirovki tonovogo klassifikatora [Automatic construction and analysis of the short texts dataset (microblogging posts) for the task of developing and training sentiment classifier]. *Inzhenerija znanij i tehnologii semanticheskogo veba*. 2012. T. 1. C. 109–116.
- 26. Loukachevitch N., Levchik A. Creating a general russian sentiment lexicon. *Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'16)*. 2016.
- 27. Karpovich S.N. The Russian language text corpus for testing algorithms of topic model. *SPIIRAS Proceedings*. 2015. T. 39. C. 123–142.
- 28. Bastian M., Heymann S., Jacomy M. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *Third international AAAI conference on weblogs and social media.* 2009.
- 29. Jacomy M. et al. ForceAtlas2, a continuous graph layout algorithm for handy network visualization designed for the Gephi software. PloS one. 2014. № 6. T. 9. p. e98679.