

ISSN 2713-220X

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:
ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

2023 № 1 (Том 4)

**SCIENTIFIC RESEARCHES:
RESULTS AND PROSPECTS**

2023 № 1 (Том 4)

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Скрылева Е.И., Никитин В.Ф. Численное моделирование неустойчивого вытеснения нефти из пористой среды с учетом химических взаимодействий между фазами
3
Алексеева А.А. Исследование влияния термомодификации и обработки перекисью водорода на сорбционные свойства листового опада по отношению к нефти
9

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Калмыков И.А., Духовный Д.В. Метод построения помехоустойчивого кода полиномиальной системы классов вычетов, обеспечивающего допустимую вероятность ошибочного приёма в канале связи
15

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Шабанов Ш.Ш., Кардашова Г.Д. Анализ структуры и свойств системы «карбид кремния-карбид ниобия», полученной спеканием без давления
23
Юнусова Н.Р., Козловский В.И., Бутаев М.Р., Скасырский Я.К. Сравнение расчетных значений оптических переходов со спектром люминесценции выращенных гетероструктур второго типа CdS/ZnSe
29

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

Рябичева Л.А., Дядичев А.В. Исследование ресурса пластичности для порошковых пористых материалов при их деформации
34
Гасанов Б.Г., Сиротин П.В., Исмаилов М.А., Харченко Е.В. Повышение ударно-абразивной износостойкости деталей клапана бурового насоса
39

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Байрамуков С.Х. Определение жесткости железобетонной конструкции с учетом влияния вышележащих этажей и жесткости опор в условиях экстремальных воздействий
45
Муцанов А.В., Цепляев М.Н. Оценка устойчивости стержневых элементов пространственных металлических конструкций
52
Правила оформления и представления статей
58

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный технический университет»

Редакционная коллегия:

Н.Л. Баламирзоев, к.э.н., доцент, главный редактор (Махачкала)
Г.Х. Ирзаев, к.т.н., доцент, зам. главного редактора (Махачкала)
Г.М. Абакаров, д.х.н., профессор (Махачкала)
Э.К. Агаханов, д.т.н., профессор (Махачкала)
Р.М. Алиев, д.т.н., профессор (Махачкала)
Х.Х. Ахмадова, д.т.н., профессор (Грозный)
М.Э. Ахмедов, д.т.н., профессор (Махачкала)
М.У. Ахмедпашаев, д.т.н., профессор (Махачкала)
П.Ю. Бочкарев, д.т.н., профессор (Саратов)
Р.В. Гусейнов, д.т.н., профессор (Махачкала)
М.Ю. Карелина, д.т.н., профессор (Москва)
Д.А. Магомедов, д.т.н., профессор (Махачкала)
К.П. Манжула, д.т.н., профессор (С-Петербург)
А.Н. Мурашкевич, д.т.н., профессор (Минск)
А.Н. Остриков, д.т.н., профессор (Воронеж)
Г.К. Сафаралиев, д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН (Москва)
А.Р. Тагилаев, д.т.н., профессор (Махачкала)
И.И. Татарченко, д.т.н., профессор (Краснодар)
С.У. Увайсов, д.т.н., профессор (Москва)
Т.А. Хежев, д.т.н., профессор (Нальчик)
Н.К. Юрков, д.т.н., профессор (Пенза)

При перепечатке ссылка на журнал «Научные исследования: итоги и перспективы» обязательна.

Все поступившие в редакцию материалы подлежат рецензированию.

Мнения авторов могут не совпадать с точкой зрения редакции.

Редакция в своей деятельности руководствуется рекомендациями Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Условия публикации статей размещены на сайте: <http://dstu.ru>.

Журнал включен в базы данных eLIBRARY и индексируется в национальной информационно-аналитической системе – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес редакции: 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70
Телефон: +7 (8722) 62 37 15
E-mail: naukajournal@mail.ru.

ISSN 2713-220X

2023 № 1 (Vol. 4)

CONTENTS

EARTH SCIENCES

Skryleva E.I., Nikitin V.F. Numerical modeling of unstable oil displacement from a porous medium, taking into account chemical interactions between phases

3

Alekseeva A.A. Investigation of the effect of thermal modification and treatment with hydrogen peroxide on the sorption properties of leaf litter in relation to oil

9

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Kalmykov I.A., Dukhovny D.V. A method for constructing an error-correcting code of a polynomial system of residue classes that provides an acceptable probability of erroneous reception in a communication channel

15

MICROELECTRONICS

Shabanov Sh.Sh., Kardashova G.D. Analysis of the structure and properties of the «silicon carbide-niobium carbide» system obtained by sintering without pressure

23

Yunusova N.R., Kozlovsky V.I., Butaev M.R., Skasyrsky Ya.K. Comparison of the calculated values of optical transitions with the luminescence spectrum of grown heterostructures of the second type CdS/ZnSe

29

MECHANICAL ENGINEERING

Ryabicheva L.A., Dyadichev A.V. Study of plasticity resource for porous powder materials during their deformation

34

Gasarov B.G., Sirotin P.V., Ismailov M.A., Kharchenko E.V. Improving the shock-abrasive wear resistance of mud pump valve parts

39

BUILDING AND ARCHITECTURE

Bairamukov S.Kh. Determination of the rigidity of a reinforced concrete structure, taking into account the influence of the overlying floors and the rigidity of the supports under conditions of extreme impacts

45

Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. Evaluation of the stability of bar elements of spatial metal structures

52

Rules for writing and submitting articles

58

Founder and Publisher: federal state budgetary educational institution of higher education «Daghestan State Technical University»

Editorial team:

N.L. Balamirzoev, Ph.D., Associate Prof., Chief editor (Makhachkala)

G.Kh. Irzaev, Ph.D., Associate Prof., Deputy Chief Editor (Makhachkala)

G.M. Abakarov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

E.K. Agakhanov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

R.M. Aliev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

Kh.Kh. Akhmadova, Doctor of Science, Prof. (Grozny)

M.E. Akhmedov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

M.U. Akhmedpashaev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

P.Yu. Bochkarev, Doctor of Science, Prof. (Saratov)

R.V. Guseynov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

M.Yu. Karelina, Doctor of Science, Prof. (Moscow)

D.A. Magomedov, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

K.P. Manzhula, Doctor of Science, Prof. (St. Petersburg)

A.N. Murashkevich, Doctor of Science, Prof. (Minsk)

A.N. Ostrikov, Doctor of Science, Prof. (Voronezh)

G.K. Safaraliev, Doctor of Science, Prof. (Moscow)

A.R. Tagilaev, Doctor of Science, Prof. (Makhachkala)

I.I. Tatarchenko, Doctor of Science, Prof. (Krasnodar)

S.U. Uvaisov, Doctor of Science, Prof. (Moscow)

T.A. Khezhev, Doctor of Science, Prof. (Nalchik)

N.K. Yurkov, Doctor of Science, Prof. (Penza)

When reprinting a link to the journal «Scientific researches: results and prospects» required.

All materials received by the editors subject to review.

The opinions of the authors may not coincide with the views of the publisher.

The editors in their activities guided by the recommendations of the Committee on Publication Ethics.

The conditions for publishing articles are available on the website: <http://dstu.ru>.

The journal is included in the eLIBRARY data bases and indexed in the national information and analytical system - Russian Science Citation Index (RSCI).

Editorial office: 70 I. Shamily Ave., Makhachkala, Republic of Daghestan, 367026, Russia.

Tel.: +7 (8722) 62 37 15

E-mail: naukajournal@mail.ru.

ISSN 2713-220X

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ

Е.И. Скрылева, В.Ф. Никитин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
jennyne@yandex.ru

Аннотация. Разработана математическая модель вытеснения вязкой жидкости (нефти) из пористой среды с учётом химических взаимодействий между фазами, которые влияют на скорость протекания химической реакции. Вязкая нефть вытесняется менее вязкой жидкостью или газом и на фронте вытеснения развивается неустойчивость Саффмана-Тейлора в виде каналов, увеличивающих площадь контакта между фазами. На основе предложенной математической модели разработан программный код для численного моделирования процесса вытеснения нефти. Разработанный программный пакет позволяет оценивать эффективность применения термогазового метода увеличения нефтеотдачи пласта на месторождениях с различными характеристиками.

Ключевые слова: вязкая нефть, неустойчивость вытеснения, термогазовый метод, увеличение нефтеотдачи, численное моделирование, фильтрация.

Abstract. A mathematical model has been developed for the displacement of a viscous liquid (oil) from a porous medium, taking into account chemical interactions between phases that affect the rate of a chemical reaction. Viscous oil is displaced by a less viscous liquid or gas, and the Saffman-Taylor instability develops at the displacement front in the form of channels that increase the contact area between the phases. Based on the proposed mathematical model, a software code for numerical simulation of the oil displacement process has been developed. The developed software package allows evaluating the effectiveness of using the thermogas method of enhanced oil recovery in fields with different characteristics.

Key words: viscous oil, displacement instability, thermogas method, enhanced oil recovery, numerical simulation, filtration.

Введение и постановка задачи

В мире активно развиваются инновационные методы разработки месторождений трудноизвлекаемых углеводородов. В условиях «нефтегазовой» экономики ключевая стратегическая проблема – разработка отечественных технологий разведки и добычи нефти и газа, обеспечивающих минимально возможную стоимость единицы продукции. Повышение нефтеотдачи пластов связано с качеством вытеснения нефти, насыщающей подземные резервуары, с помощью воды или мицеллярно-полимерных растворов. В процессе разра-

ботки различных стратегий повышения коэффициента извлечения нефти важную роль может играть предсказательное моделирование подземной гидродинамики [1] с учетом внешних активных воздействий на пласт: механических, термических, химических и комбинированных. Одни из самых перспективных методов увеличения нефтеотдачи пласта – термохимические [2, 3, 4], которые характеризуются закачкой в пласт нагретого вытесняющего агента (например, смесь газа и воды). Нагретый кислород или воздух вступает в реакцию с углеводородом (рисунок 1), в результате чего

происходит его окисление с выделением тепла; в качестве продуктов химической реакции образуются углекислый газ и водяной пар. В результате экзотермической реакции темпера-

тура флюида повышается, а вязкость падает. Это способствует ускорению процесса вытеснения нефти из пласта.

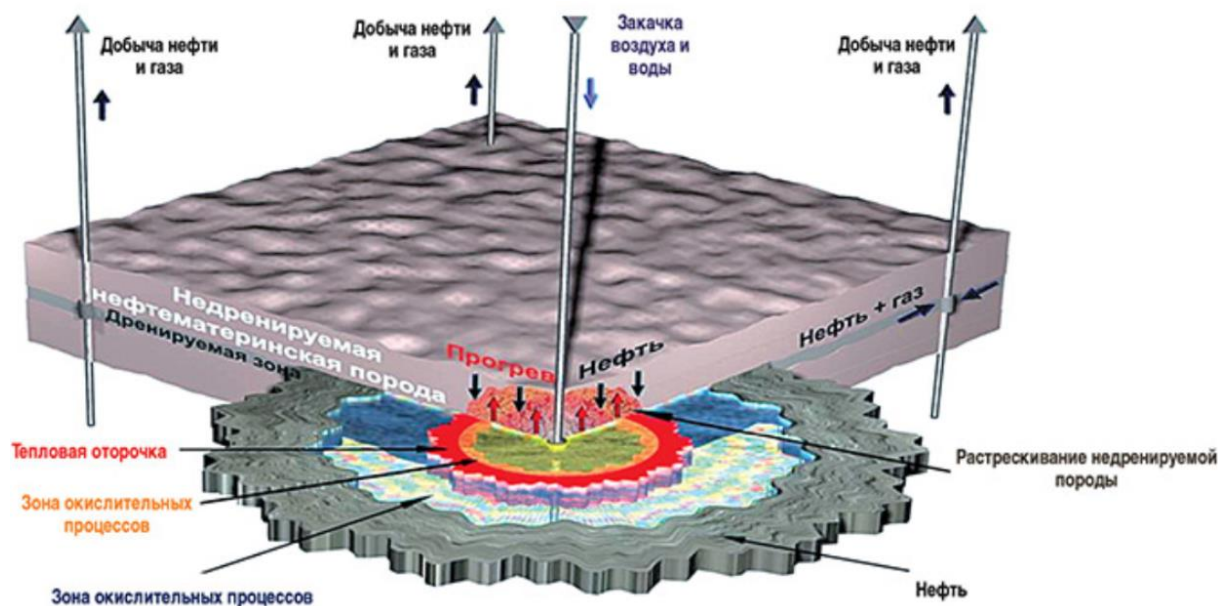


Рисунок 1 – Термогазовый метод нефтедобычи

Задача вытеснения углеводородов осложняется тем, что в практических случаях ее приходится решать на значительном пространственном масштабе. В то же время из-за использования менее вязкой воды для вытеснения более вязкой смеси углеводородов (пластовой нефти) этот процесс является неустойчивым [5, 6]: фронт вытеснения, даже если он был вначале прямым, искажается за счет пальцеобразных выступов, по которым менее вязкая вода прорывается к добывающей скважине, оставляя позади себя невытесненную нефть. После достижения одним из таких выступов добывающей скважины картина вытеснения резко меняется – большая часть подаваемой воды будет направляться в канал, созданный лидирующим пальцем. В скважину начинает закачиваться уже не нефть, а ее смесь с вытесняющей водой, причем процент воды будет быстро увеличиваться. Оставшаяся же в пласте нефть после такого прорыва будет практически неподвижна.

Ещё одна сложность заключается в том, что такая неустойчивость многомасштабна, и возможность ее моделирования осложняется тем, что наиболее быстро растут мелкомас-

штабные пальцы. Основная проблема прямого моделирования неустойчивости в том, что разрешение мелкомасштабных потоков на практической сетке нереально даже с использованием современной вычислительной техники. Например, при обработке малого участка месторождения размером 10×10×1 км с ячейками размером 1×1×1 м потребуется 100 млрд ячеек. Поэтому крайне актуальна разработка алгоритмов для многомасштабного моделирования нелинейных процессов подземной гидродинамики.

В случае, когда между вытесняющей и вытесняемой фазами происходят химические реакции, большое влияние на процесс начинает оказывать неустойчивость вытеснения, так как происходит увеличение площади контактной поверхности между реагирующими веществами. Поэтому важным является учёт неустойчивости (в том числе мелкомасштабной) при моделировании таких процессов. Таким образом, роль фундаментальных исследований неустойчивого вытеснения вязких жидкостей из пористой среды с учётом термохимических реакций между фазами путем мно-

гомасштабного моделирования трудно переоценить.

Построение математической модели

Рассматривается трёхфазный (нефть, вода и газ) поток сквозь пористую среду. При-

стость и проницаемость среды будем считать постоянными, капиллярным давлением пренебрежём. Запишем уравнения баланса массы для каждой фазы с учётом дополнительных факторов, связанных с размытием фронта за счёт неустойчивости вытеснения и диффузии:

$$\frac{\partial \rho_k s_k \phi}{\partial t} + \nabla(\rho_k w_k + \rho_i (F_i(s, M, Pe) w_k - D_i(s, v, M, Pe) \nabla s_i)) = \dot{m}_k(T, Y_{O_2}, s_i), \quad k = w, o, g;$$

Здесь ρ_k – плотность фазы, s_k – насыщенность фазы, ϕ – пористость среды, w_k – скорость фильтрации фазы, \dot{m}_k – скорость рождения массы, Y_i – концентрация i -го компонента газовой фазы

В уравнении баланса массы коэффициент F_i отвечает за размытие фронта за счёт роста вязких пальцев, а коэффициент D_i – за размытие фронта за счёт диффузии.

Коэффициенты F_i и D_i для различных значений отношения вязкостей M и числа Пекле Pe могут быть получены осреднением результата многомерного расчёта, подробно эта процедура описана в работе [6].

Запишем уравнения баланса массы для каждого компонента газовой фазы:

$$\frac{\partial Y_i \rho_g (p, T, Y_j) s_g \phi}{\partial t} + \nabla(Y_i \rho_g w_g (1 + F)) = \dot{m}_i(T, Y_{O_2}, s_i), \quad i = N_2, O_2, CO_2, H_2O(g);$$

А также уравнения баланса импульса в форме закона Дарси: $\vec{w}_i = -\frac{kk_{ri}}{\mu_i} \nabla p$
где k_{ri} – относительная проницаемость i -ой фазы

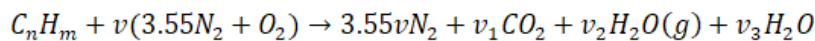
Уравнения притока тепла для скелета и потока:

$$\frac{\partial (1 - \phi) \rho_s E_s(T_s)}{\partial t} = -\nabla q_s(T_s) - \Delta Q(T, T_s); \quad i = w, o, g, \quad j = N_2, O_2, CO_2, H_2O(g);$$

$$\frac{\partial \phi \rho E(p, T, s_i, Y_j)}{\partial t} + \nabla \left(\sum_{k=w,o,g} \rho_k w_k (1 + F) s_k e_k(T) \right) = -\nabla q(T) + \Delta Q(T, T_s) + \Delta Q_r(T, Y_{O_2}, s_i);$$

где $E_s(T_s)$, $E(p, T, s_i, Y_j)$ – внутренняя энергия скелета и флюида соответственно, $q_i = \phi \sum_{i=w,o,g} \kappa_i s_i \nabla T$, $q_s = (1 - \phi) \kappa_s \nabla T_s$ – вектор притока тепла через поверхность к флюиду и скелету соответственно, $\Delta Q(T, T_s) = C(T_s - T)$ – теплообмен между скелетом пористой среды и флюидом, $\Delta Q_r = \dot{m}_{O_2} \Delta H$ – поток тепла за счёт химической реакции, $\Delta H = e_w - e_o - e_{gN_2} Y_{N_2} - e_{gO_2} Y_{O_2} + e_{gH_2O(g)} Y_{H_2O(g)} + e_{gCO_2} Y_{gCO_2}$, $e_i(T, Y_j)$ – внутренние энергии фаз.

Также будем учитывать коэффициент F при моделировании скорости зарождения массы \dot{m}_i . В скважину закачивается смесь азота и кислорода. Предполагается следующая сборка реакций:



Баланс устанавливается при следующих предположениях:

$$v = n + 0.25m, \quad v_1 = n, \quad v_2 = v_3 = 0.25m$$

Скорость реакции: $\dot{\omega} = \kappa(T) Y_{O_2} s_g s_o (1 + eF)$,

где $\kappa(T)$ – коэффициент скорости реакции по закону Аррениуса

$$\kappa(T) = \begin{cases} 0, & T < T_r \\ \Lambda e^{-\frac{T_a}{T}}, & T \geq T_r \end{cases}$$

Здесь Λ – предэкспоненциальный множитель, T_a – температура активации, T_r – пороговая температура, T_a – температура активации, T_r – пороговая температура. Получаем следующие выражения для скорости зарождения массы для фаз и компонент:

$$\begin{aligned} \dot{m}_w &= \dot{m}_{H_2O} = \dot{\omega} v_2 W_{H_2O}, & \dot{m}_{N_2} &= 0 \\ \dot{m}_g &= \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O(g)}, & \dot{m}_{O_2} &= -\dot{\omega} v W_{O_2} \\ \dot{m}_o &= -\dot{m}_w - \dot{m}_g, & \dot{m}_{CO_2} &= \dot{\omega} v_1 W_{CO_2} \\ & & \dot{m}_{H_2O(g)} &= \dot{\omega} v_2 W_{H_2O(g)} \end{aligned}$$

где W_i – молярные массы соответствующих веществ.

На рисунке 2 показаны результаты расчетов с химическими реакциями и без них. Зеленая и красная кривые показывают случай, когда расчет проводился без дополнительных факторов, связанных с неустойчивостью вытеснения. В случае наличия химических реакций (зеленая кривая) вытеснение происходит значительно быстрее, например, содержание нефти 50% достигается за 3500 с, а при отсутствии химических реакций (красная кривая) за 5500 с. Аналогичный результат получен для случая учета дополнительных факторов, связанных с неустойчивостью: желтая и фиолето-

вая кривые. Ускорение процесса вытеснения связано в данном случае со снижением вязкости нефти за счет экзотермической химической реакции между вытесняющей и вытесняемой фазами. Таким образом, термогазовый метод повышения нефтеотдачи пластов является высокоэффективным. С увеличением отношения вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей неустойчивость фронта вытеснения развивается сильнее, в то время как скорость фронта уменьшается, а время полного вытеснения увеличивается.

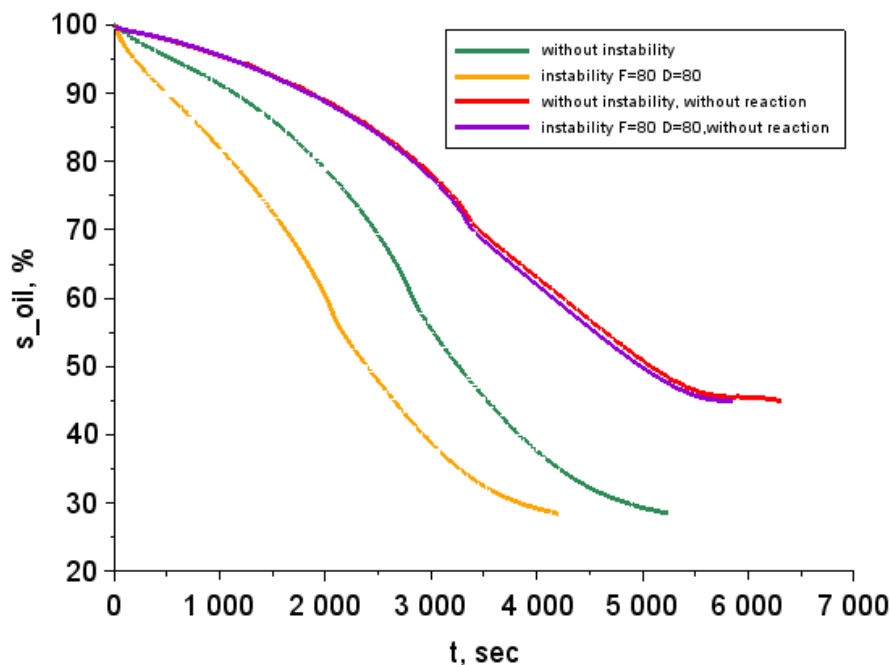


Рисунок 2 – Сравнение результатов расчёта с химическими реакциями и без них

Также следует отметить, что в случае, когда не учитываются химические реакции, расчеты с дополнительными факторами, связанными с неустойчивостью, и без них практически совпадают (фиолетовые и красные кривые соответственно). В то же время для расчетов с

химическими реакциями (желтая и зеленая кривые) учет размытия фронта из-за неустойчивости существенно влияет на динамику вытеснения. Таким образом, при моделировании процесса вытеснения жидкости из пористой среды с учетом химических взаимодействий

между фазами необходимо учитывать дополнительные члены в уравнении, связанные с размытием фронта из-за неустойчивости вытеснения.

Выводы

Разработана математическая модель для предсказательного моделирования процесса вытеснения нефти с применением термогазового метода увеличения нефтеотдачи. Модель основана на законе Дарси и учитывает относительные фазовые проницаемости, капилляр-

ные эффекты, эффект уменьшения вязкости нефти за счет экзотермических химических реакций и сжимаемости флюида. Для описания используется трехфазная модель флюида в пористой среде. Фазы считаются несмешивающимися, а скелет – неподвижным. На основе полученной математической модели проведены численные эксперименты [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 22-21-00236.

Библиографический список

1. Бетелин В.Б., Кушниренко А.Г., Смирнов Н.Н. Технологии супервычислений экзафлопного класса и обеспечение конкурентоспособности энергетики России // НефтеГазоПромысловый инжиниринг. 2011. № 3. С. 10-13.
2. Вольпин С.Г., Смирнов Н.Н., Кравченко М.Н., Диева Н.Н. Моделирование импульсно-волновой обработки нефтяных пластов методом термогазохимического воздействия // Сборник научных трудов ОАО «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт им. акад. А.П. Крылова». 2013. Вып. 149. С. 127-137.
3. Вольпин С.Г., Сaitгареев А.Р., Смирнов Н.Н., Кравченко М.Н., Корнаева Д.А., Диева Н.Н. Перспективы применения волновой технологии термогазохимического воздействия для повышения нефтеотдачи пластов // Нефтяное хозяйство. 2014. № 1. С. 62-66.
4. Kravchenko M.N., Dieva N.N., Lishchuk A.N., Muradov A.V., Vershinin V.E. Hydrodynamic modeling of thermochemical treatment of low permeable kerogen-containing reservoirs. Georesursy = Georesources, 20(3), 2018, Part 1, pp. 178-185. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.178-185>.
5. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Kolenkina E.I., Gazizova D.R. Evolution of a phase interface in the displacement of viscous fluids from a porous medium. Fluid Dynamics, 2021, v. 56, № 1, pp. 79–92, <http://dx.doi.org/10.1134/S0015462821010122>.
6. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Maximenko A., Thiercelin M., Legros J.C. Instability and mixing flux in frontal displacement of viscous fluids from porous media, Physics of Fluids, 2005, vol.17, pp. 84-102.
7. Xu Yang, Yingjie Liang, Wen Chen. A Spatial Fractional Seepage Model for the Flow of Non-Newtonian Fluid in Fractal Porous Medium. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2018; 65: 70–78.
8. Yibin Huang, Yanjun Zhang, Ziwang Yu, Yueqiang Ma, Chi Zhang. Experimental Investigation of Seepage and Heat Transfer in Rough Fractures for Enhanced Geothermal Systems. Renewable Energy. 2019; 135: 846–855.
9. Никитин В.Ф., Скрылева Е.И., Макеева М.Н., Манахова А.Н. Моделирование неустойчивого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды с учетом химических взаимодействий между фазами // Успехи кибернетики. 2022. № 3(3). С. 22–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-3.

Referenses

1. Betelin V.B., Kushnirenko A.G., Smirnov N.N. Tekhnologii supervychislenij eksaflopnogo klassa i obespechenie konkurentosposobnosti energetiki Rossii // NefteGazoPromyslovij inzhiniring. 2011. № 3. С. 10-13.
2. Vol'pin S.G., Smirnov N.N., Kravchenko M.N., Dieva N.N. Modelirovanie impul'sno-volnovej obrabotki neftyanyh plastov metodom termogazohimicheskogo vozdejstviya // Sbornik nauchnyh trudov ОАО «Vserossijskij neftegazovij nauchno-issledovatel'skij institut im. akad. A.P. Krylova». 2013. Vyp. 149. С. 127-137.
3. Vol'pin S.G., Saitgareev A.R., Smirnov N.N., Kravchenko M.N., Kornaeva D.A., Dieva N.N. Perspektivy primeneniya volnovej tekhnologii termogazohimicheskogo vozdejstviya dlya povysheniya nefteotdachi plastov // Neftyanoe hozyajstvo. 2014. № 1. С. 62-66.
4. Kravchenko M.N., Dieva N.N., Lishchuk A.N., Muradov A.V., Vershinin V.E. Hydrodynamic modeling of thermochemical treatment of low permeable kerogen-containing reservoirs. Georesursy = Georesources, 20(3), 2018, Part 1, pp. 178-185. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.178-185>.

5. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Kolenkina E.I., Gazizova D.R. Evolution of a phase interface in the displacement of viscous fluids from a porous medium. *Fluid Dynamics*, 2021, v. 56, № 1, pp. 79–92, <http://dx.doi.org/10.1134/S0015462821010122>.

6. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Maximenko A., Thiercelin M., Legros J.C. Instability and mixing flux in frontal displacement of viscous fluids from porous media, *Physics of Fluids*, 2005, vol.17, pp. 84-102.

7. Xu Yang, Yingjie Liang, Wen Chen. A Spatial Fractional Seepage Model for the Flow of Non-Newtonian Fluid in Fractal Porous Medium. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2018; 65: 70–78.

8. Yibin Huang, Yanjun Zhang, Ziwang Yu, Yueqiang Ma, Chi Zhang. Experimental Investigation of Seepage and Heat Transfer in Rough Fractures for Enhanced Geothermal Systems. *Renewable Energy*. 2019; 135: 846–855.

9. Nikitin V.F., Skryleva E.I., Makeeva M.N., Manahova A.N. Modelirovanie neustojchivogo vytesneniya vyazkoj zhidkosti iz poristoj sredy s uchetom himicheskikh vzaimodejstvij mezhdru fazami // *Uspekhi kibernetiki*. 2022. № 3(3). S. 22–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-3.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 07.11.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 21.11.2022

Принята к публикации / Accepted 12.01.2023

© Е.И. Скрылева, В.Ф. Никитин, 2023

Сведения об авторах **List of Authors**

Скрылева Евгения Игоревна – научный сотрудник кафедры волновой и газовой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.
Evgenia Skryleva – Researcher, Department of Wave and Gas Dynamics, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University.

Никитин Валерий Федорович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры волновой и газовой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Valery Nikitin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Wave and Gas Dynamics, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University.

Ссылка для цитирования: *Скрылева Е.И., Никитин В.Ф.* Численное моделирование неустойчивого вытеснения нефти из пористой среды с учетом химических взаимодействий между фазами // *Научные исследования: итоги и перспективы*. 2023. Т. 4, № 1. С. 3 - 8. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-3-8.

For citation: *Skryleva E.I., Nikitin V.F.* Numerical modeling of unstable oil displacement from a porous medium, taking into account chemical interactions between phases // *Scientific researches: results and prospects*. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 3 - 8. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-3-8.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМОДИФИКАЦИИ И ОБРАБОТКИ ПЕРЕКИСЬЮ ВОДОРОДА НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИСТОВОГО ОПАДА ПО ОТНОШЕНИЮ К НЕФТИ

А.А. Алексеева

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань
420015, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 68
alekseevaAA@corp.knrtu.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования по получению сорбционного материала на основе модифицированного листового опада с помощью химической и физико-химической обработки поверхности. В частности, исследовано влияние обработки листового опада 3% раствором H_2O_2 на его адсорбционные свойства по отношению к нефти. Показано, что модифицированный сорбционный материал, полученный в результате обработки 3% раствором H_2O_2 , обладает большими значениями водопоглощения 34% и нефтеемкости 41% по сравнению с исходным листовым опадом при времени контактирования 90 минут.

Ключевые слова: водопоглощение, листовый опад, модификация, нефтеемкость, нефть, перекись водорода, сорбционная способность.

Abstract. The results of a study on obtaining a sorption material based on modified leaf litter using chemical and physico-chemical surface treatment are presented. In particular, the effect of leaf litter treatment with a 3% H_2O_2 solution on its adsorption properties with respect to oil was studied. It is shown that the modified sorption material obtained as a result of treatment with a 3% H_2O_2 solution has higher water absorption values of 34% and oil capacity of 41% compared to the original leaf litter at a contact time of 90 minutes.

Key words: water absorption, leaf litter, modification, oil capacity, oil, hydrogen peroxide, sorption capacity.

Введение

Отрицательное воздействие человека и производства на окружающую природную среду постоянно увеличивается и сопоставимо с ростом населения и развитием промышленности. Значительный вклад в загрязнение окружающей среды вносит нефтехимическая промышленность, а именно, эмиссия в окружающую среду нефти. Загрязнение природной окружающей среды нефтью является острой экологической проблемой, особенно в районах добычи, транспортировки и переработки нефти. Разливы нефти на поверхности воды и суши происходят постоянно, как правило, по двум причинам – эксплуатационным и аварийным. Аварийные разливы нефти могут провоцировать стихийные бедствия, неисправность оборудования и трубопроводов, износ технологических узлов, а также несоблюдение про-

мышленной безопасности на объекте нефтяного хозяйства.

Несмотря на предпринимаемые государством и промышленностью меры по недопущению попадания нефти в окружающую среду, количество аварий растет. Так, в 2022 году в России самые крупные нефтеразливы произошли в городах Химки, Находка, Норильск, Новая Кежма, при этом большая часть аварий привела к разливу нефти на поверхностных водах [1]. Нефть, которая попадает в воду, наносит значительное отрицательное воздействие на окружающую среду – образование на поверхности пленки, растворение токсичных веществ и, как следствие, изменение биологической структуры и экосистемы водоема, нарушение качества воды. Без оперативных и эффективных мер по ликвидации нефтяного разлива деградация водоема неиз-

бежна. Нефть разносится по поверхности воды на многие километры, и последствия носят трудно учитываемый характер, поскольку нефтяное загрязнение нарушает многие естественные процессы и взаимосвязи, существенно изменяет условия обитания живых организмов и накапливается в биомассе. Результат весьма печален – непригодность воды для употребления, мгновенная гибель всего живого под сплошной нефтепленкой, медленная деградация флоры и фауны [2].

Необходимо совершенствовать систему борьбы с разливами нефтяных углеводородов при авариях танкерного флота на морских и речных акваториях с учетом природно-климатических условий. Остро стоит задача разработки новых технологий, позволяющих эффективно бороться с загрязнениями нефтью и нефтепродуктами и обладающих низкой стоимостью реализации.

Для сбора нефти с поверхности воды применяются скиммеры, но на практике их использование возможно только при моментальном ограждении нефтяного пятна, а такие случаи относительно редки. Нефть успевае растечься на большой площади, толщина пленки обычно составляет 0,5...5,0 мм, реальная производительность сбора нефти резко падает. В этом случае для сбора применяются сорбенты [3]. Именно поэтому, а также благодаря своей эффективности и экономичности, большую популярность среди физико-механических методов ликвидации нефтяных разливов получил процесс сорбции. Кроме того, сорбционная очистка позволяет удалять загрязнения широкого состава при различных концентрациях поллютанта в воде. Одно из важных требований, предъявляемых к сорбенту, – отсутствие вторичного загрязнения воды. В этом случае для ликвидации могут применяться экологичные природные материалы.

Перспективным методом является сорбционная очистка, к преимуществам которой относятся возможность удаления загрязнений самой широкой природы до любых остаточных концентраций, управляемость процессом, отсутствие вторичных загрязнений [3]. Очевидно, что наиболее доступными становятся отечественные сорбенты, особенно растительного происхождения, которые можно будет полу-

чать непосредственно в регионе добычи нефти или нефтепереработки, к таким регионам относится Республика Татарстан [4].

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Автором статьи проведены исследования по получению сорбционного материала на основе модифицированного листового опада с помощью химической и физико-химической обработки поверхности [5, 6]. При характеристике листового опада как отхода, возникает задача его утилизации, которая в настоящее время, как правило, осуществляется в виде захоронения на полигонах. Более рациональным является применение листового опада в качестве сорбционного материала. В зарубежной литературе приводится информация по использованию листьев для удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод [7, 8], а также для поглощения красителей [9, 10].

Однако, перед применением листового опада в качестве сорбционного материала необходимо улучшить его технологические и поглощающие свойства. Для сорбента важны такие свойства, как высокая нефтепоглощающая способность, плавучесть, низкая стоимость, доступность и др. С целью повышения времени удерживания нефти и повышения плавучести, а также на основании литературных данных проведена обработка листового опада физическим методом (обработка при температуре 90°C) и химическим методом (обработка 3% раствором перекиси водорода) [11]. Нефть впитывается в сорбент на начальной стадии за счёт быстропотекающей адсорбции, при которой поверхность адсорбента смачивается нефтью.

Эксперимент проводился следующим образом: предварительно высушенный до постоянной массы и измельченный до размеров, не превышающих 20×20 мм листовый опад, состоящий из 60 – 80% листьев липы, 10 – 20% листьев березы, 3 – 4% листьев осины и 1 – 2% листьев других видов деревьев, навеской 20 г помещали в конические колбы на 200 дм³, которые заполняли 3% раствором H₂O₂ объемом 200 см³, время контактирования составляло 20 минут. Для физической модификации была выбрана термомодификация: вы-

держивание в муфельной печи в течение 30 мин. при минимальной температуре 90°С. После у полученных образцов определялись ос-

новные сорбционные характеристики по методикам [12, 13] (таблица).

Таблица – Основные характеристики исходного и модифицированных образцов листового опада

Параметры	Листовой опад исходный	Листовой опад, обработанный перекисью водорода в течение 20 мин	Термомодифицированный листовый опад при 90°С
Влажность, %	13	6	7
Зольность, %	0,98	0,55	0,19
Плаучесть, 3 сут., %	64	88	57

Из таблицы 1 видно, что обработка листового опада 3% раствором H_2O_2 способствует росту плаучести на 30%, при этом плаучесть у термомодифицированного образца снижается. Это обусловлено освобождением пор от влаги при воздействии температуры. При этом очевидно, что обработка перекисью водорода придает листовому опаду гидрофобные свойства. Следовательно, для дальнейших исследований был выбран образец, модифицированный перекисью водорода.

С целью исследования влияния модификации листового опада 3% раствором H_2O_2 при различном времени контактирования на его сорбционную способность по отношению к воде и нефти проведены эксперименты в статических условиях.

Далее были проведены эксперименты по определению водопоглощения и нефтеёмкости (девонская нефть Тумукского месторождения) исходного листового опада и модифицированных образцов (рисунки 1 и 2).

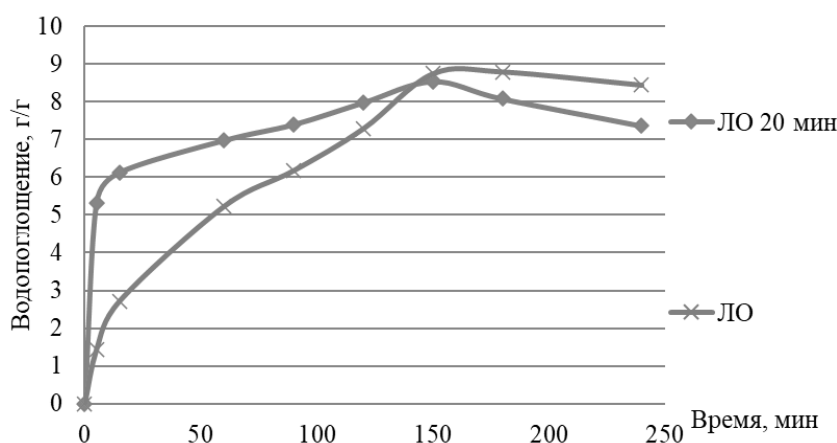


Рисунок 1 – Сорбционная ёмкость по воде

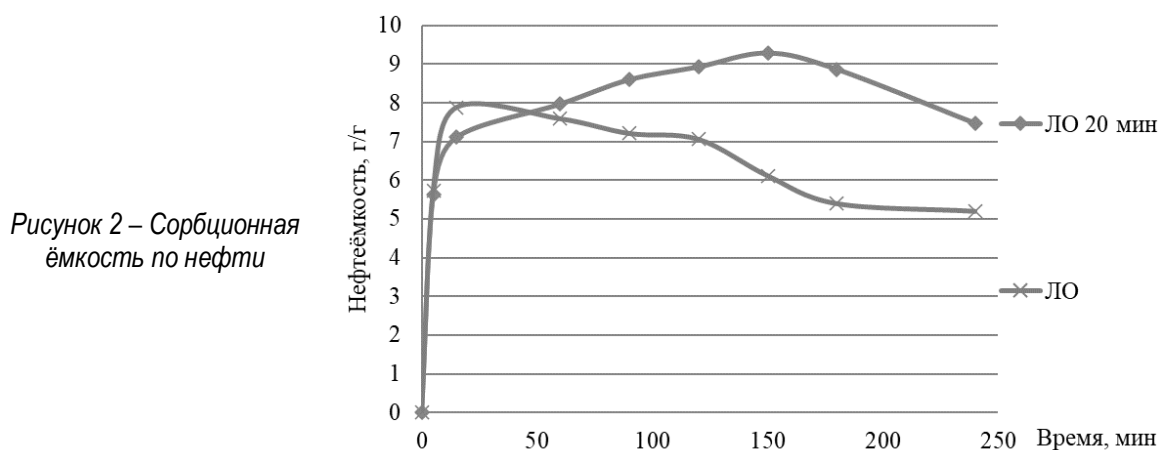


Рисунок 2 – Сорбционная ёмкость по нефти

Кривые, представленные на рисунке 1, показывают, что характер поглощения воды и нефти у нативного и модифицированного образцов различен. Так, поглощение воды у необработанного образца идет равномерно, достигает максимального значения 8,75 г/г при 150 минутах контактирования, затем на 250 минуте наблюдается десорбция воды из листового опада. У модифицированного образца уже при 5 минутах контактирования сорбционная емкость воды составляет 5-6,5 г/г (в зависимости от режима модификации) и постепенно увеличивается до 120 минут, после наблюдается более интенсивная десорбция, чем у необработанного образца. Это может быть связано с тем, что в процессе модификации происходит промывка пор сорбента, и свободные поры быстрее заполняются водой.

Характер поглощения нефти, представленный на рисунке 2, отличается от характера поглощения воды. Так, у необработанного образца максимальное нефтепоглощение наблюдается при времени 15 минут – 7,8 г/г, после происходит десорбция и при времени экспозиции 250 минут нефтепоглощение составляет 5,2 г/г. У обработанного же образца сорбционная емкость по отношению к нефти увеличивается до 180 минут, значительная

десорбция наблюдается у образца, обработанного в течение 20 минут, и при 250 минутах составляет 7,4 г/г.

Выводы

По результатам выполненных исследований можно сделать вывод: смешанный листовый опад – эффективный сорбционный материал для удаления пленки нефти с поверхности воды. Он обладает развитой пористой поверхностью и высокой степенью очистки (97...99%). Эксперименты показали, что обработка листового опада 3% раствором H_2O_2 приводит к увеличению сорбционной емкости по отношению к нефти на 30%, вероятно за счет промывки и освобождения пор при модификации, а также образования на поверхности функциональных групп кислотного характера.

При этом обработка материала при температуре не гидрофобизирует поверхности, однако есть основания полагать, что увеличение сорбционной емкости может наблюдаться и по иным причинам, например, за счет сил притяжения, возникающих между молекулами нефти и сорбента на границе раздела контактирующих фаз, или за счет изменения структуры материала при термообработке [14].

Библиографический список

1. Разливы нефти: почему они случаются так часто и можно ли их предотвратить. РБК: [сайт]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/5fb2784e9a79477fa024d069/> (дата обращения: 01.11.2022).
2. Сидоров В.В. Ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов на водной и наземной поверхности // Справочник эколога. 2013. № 2. С. 67–70.
3. Любин В.Е., Кусаинов А.Б., Захаров И.А. Ликвидация чрезвычайных ситуаций при разливе нефти и нефтепродуктов на воде и на суше: учебное пособие. Кокшетау, 2014. 125 с.
4. Минаков В.В., Кривенко С.М., Никитина Т.О. Новые технологии очистки от нефтяных загрязнений // Экология и промышленность России. 2002. № 5. С. 7–9.
5. Алексеева А.А. Исследования технологической возможности использования листового опада в качестве сорбционного материала по отношению нефти // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сборник статей XX международной научно-практической конференции / Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лушкина. Пенза, 2022. С. 7-11.
6. Алексеева А.А., Степанова С.В. Кинетика сорбции нефти материалом на основе листового опада // Безопасность в техносфере. 2018. Т. 7. № 2. С. 10-14.
7. Development of Wood Apple Shell (*Feroniaacidissima*) Powder Biosorbent and Its Application for the Removal of Cd(II) from Aqueous Solution / D. Harikishore Kumar Reddya [et al.] // Carbohydrate Polymers. 15 April 2012. Vol. 88, Issue 3. P. 1077–1086.
8. Comparative Study of Removal of Chromium-IV Ion from Aqueous Solution Using Eucalyptus, Neem and Mango Leaves / S. Vijay Kumar [et al.] // International J. of Engineering Research and Development. 2013. Vol. 8. P. 56–61.

9. Removal of Methylene Blue from Aqueous Effluent Using Fixed Bed of Groundnut Shell Powder / V. Ponnusami [et al.] // Chemical Engineering J. 2008. Vol. 140. P. 609–613.
10. Evaluation of grinding Salix leaves (gsl) as new sorbent material / I.M. El-Diena [et al.] // Desalination and Water Treatment, 2013. Vol. 51. P. 2564-2574.
11. Абдель-Гадир Б.М., Кузнецова Г.М., Ягафарова Г.Г. Поиск сорбентов для очистки водных объектов от нефтяных загрязнений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. № 4. С. 72–79.
12. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.
13. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.
14. Салимова И.Э., Алексеева А.А. Исследование физической модификации растительных отходов республики Татарстан для извлечения нефти из водных сред // Исследования изменений атмосферы, климата и динамики ландшафтов: сборник материалов V Кавказского международного экологического форума. Грозный: Изд. ЧГУ им. А.А. Кадырова, 2021. С. 276 – 279.

Referenses

1. Razlivy nefiti: pochemu oni sluchayutsya tak chasto i mozno li ih predotvratit'. RBK: [sajt]. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/5fb2784e9a79477fa024d069/> (data obrashcheniya: 01.11.2022).
2. Sidorov V.V. Likvidaciya razlivov nefiti i nefteproduktov na vodnoj i nazemnoj poverhnosti // Spravochnik ekologiya. 2013. № 2. S. 67–70.
3. Lyubin V.E., Kusainov A.B., Zaharov I.A. Likvidaciya chrezvychajnyh situacij pri razlive nefiti i nefteproduktov na vode i na sushe: uchebnoe posobie. Kokshetau, 2014. 125 s.
4. Minakov V.V., Krivenko S.M., Nikitina. T.O. Novye tekhnologii ochistki ot neftyanyh zagryaznenij // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2002. № 5. S. 7–9.
5. Alekseeva A.A. Issledovaniya tekhnologicheskoy vozmozhnosti ispol'zovaniya listovogo opada v kachestve sorbcionnogo materiala po otnosheniyu nefiti // Prirodnoresursnyj potencial, ekologiya i ustoj-chivoe razvitiye regionov Rossii: sbornik statej XX mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Pod redakciej V.A. Selezneva, I.A. Lushkina. Penza, 2022. S. 7-11.
6. Alekseeva A.A., Stepanova S.V. Kinetika sorbcii nefiti materialom na osnove listovogo opada // Bezopasnost' v tekhnosfere. 2018. T. 7. № 2. S. 10-14.
7. Development of Wood Apple Shell (Feroniaacidissima) Powder Biosorbent and Its Application for the Removal of Cd(II) from Aqueous Solution / D. Harikishore Kumar Reddy [et al.] // Carbohydrate Polymers. 15 April 2012. Vol. 88, Issue 3. P. 1077–1086.
8. Comparative Study of Removal of Chromium-IV Ion from Aqueous Solution Using Eucalyptus, Neem and Mango Leaves / S. Vijay Kumar [et al.] // International J. of Engineering Research and Development. 2013. Vol. 8. P. 56–61.
9. Removal of Methylene Blue from Aqueous Effluent Using Fixed Bed of Groundnut Shell Powder / V. Ponnusami [et al.] // Chemical Engineering J. 2008. Vol. 140. P. 609–613.
10. Evaluation of grinding Salix leaves (gsl) as new sorbent material / I.M. El-Diena [et al.] // Desalination and Water Treatment, 2013. Vol. 51. P. 2564-2574.
11. Abdel-Gadir B.M., Kuznecova G.M., YAgafarova G.G. Poisk sorbentov dlya ochistki vodnyh ob"ektov ot neftyanyh zagryaznenij // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo uni-versiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. 2018. № 4. S. 72–79.
12. Lur'e YU.YU. Analiticheskaya himiya promyshlennyh stochnyh vod. M.: Himiya, 1984. 448 s.
13. Smirnov A.D. Sorbcionnaya ochistka vody. L.: Himiya, 1982. 168 s.
14. Salimova I.E., Alekseeva A.A. Issledovanie fizicheskoy modifikacii rastitel'nyh othodov respubliki Tatarstan dlya izvlecheniya nefiti iz vodnyh sred // Issledovaniya izmenenij atmosfery, klimata i dinamiki landshaftov: sbornik materialov V Kavkazskogo mezhdunarodnogo ekologicheskogo foruma. Groznyj: Izd. CHGU im. A.A. Kadyrova, 2021. S. 276 – 279.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

The author declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 12.12.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 24.12.2022

Принята к публикации / Accepted 17.01.2023

© А.А. Алексеева, 2023

Сведения об авторе
List of Author

Алексеева Анна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии Казанского национального исследовательского технологического университета
Anna Alekseeva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Kazan National Research Technological University

Ссылка для цитирования: *Алексеева А.А.* Исследование влияния термомодификации и обработки перекисью водорода на сорбционные свойства листового опада по отношению к нефти // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 1. С. 9 - 14. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-9-14.

For citation: *Alekseeva A.A.* Investigation of the effect of thermal modification and treatment with hydrogen peroxide on the sorption properties of leaf litter in relation to oil // Scientific researches: results and prospects. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 9 - 14. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-9-14.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДА ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КЛАССОВ ВЫЧЕТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ДОПУСТИМУЮ ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБОЧНОГО ПРИЁМА В КАНАЛЕ СВЯЗИ

И.А. Калмыков, Д.В. Духовный

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь
355017, Россия, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
kia762@yandex.ru, dduhovny26@gmail.com

Аннотация. Разработан метод построения кода полиномиальной системы классов вычетов, способного исправлять пачки ошибок при передаче данных по двоичному каналу. Рассматриваются модели двоичного симметричного канала без памяти, двоичного симметричного канала с памятью и двоичного канала Гильберта-Эллиота. Дается описание кодам полиномиальной системы классов вычетов и обзор их корректирующих способностей. Для двоичного канала Гильберта-Эллиота предлагается метод построения помехоустойчивого кода полиномиальной системы классов вычетов, исправляющего пачки ошибок и обеспечивающего заданную допустимую вероятность ошибочного приёма в канале связи.

Ключевые слова: двоичный канал с памятью, информационная безопасность, модель Гильберта-Эллиота, пачка ошибок, полиномиальная система классов вычетов.

Abstract. A method has been developed for constructing a code for a polynomial system of residue classes capable of correcting bursts of errors in data transmission over a binary channel. Models of a binary symmetric channel without memory, a binary symmetric channel with memory and a binary Hilbert-Elliott channel are considered. A description is given of the codes of the polynomial system of residue classes and an overview of their corrective abilities. For a binary Hilbert-Elliott channel, a method is proposed for constructing an error-correcting code of a polynomial system of residue classes that corrects bursts of errors and provides a given admissible probability of erroneous reception in the communication channel.

Key words: binary channel with memory, information security, Hilbert-Elliott model, error burst, polynomial system of residue classes.

Введение

Обеспечение помехоустойчивости системы связи является одной из важнейших задач при её проектировании и эксплуатации. Это обусловлено возможностью искажения информационных символов при их передаче по каналу связи. Так, наиболее распространённым видом искажений в реальных каналах является пачка ошибок [1, 2], представляющая из себя непрерывную последовательность искажённых символов в сообщении. Таким образом, для решения указанной задачи необ-

ходимо использование специального помехоустойчивого кода, способного обнаруживать и исправлять подобные ошибки.

Коды полиномиальной системы классов вычетов (ПСКВ) в подавляющем большинстве случаев предлагаются для использования в целях исправления ошибок, возникших при отказах и сбоях оборудования [3, 4, 5, 6], реализации и модификации различных протоколов [3, 7]. Однако корректирующие способности кодов ПСКВ предоставляют все необходимые условия и для исправления пачки ошибок

в сообщении, переданном по двоичному каналу. Это создаёт предпосылки для использования данных кодов как для противодействия аппаратным сбоям и реализации криптографических протоколов, так и для передачи данных по каналу связи с помехами. Таким образом, разработка метода построения помехоустойчивого кода ПСКВ для исправления пачки ошибок в двоичном канале является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

Процесс построения помехоустойчивого кода в наибольшей степени опирается на модель канала связи, в рамках которого предполагается использовать данный код. Существует большое множество типовых моделей канала, однако, наиболее часто используются следующие из них [8]: двоичный симметричный канал без памяти (ДСК); двоичный симметричный канал с памятью (ДСКП); двоичный канал Гильберта-Эллиота (ДКГЭ).

ДСК является наиболее простой моделью. В соответствии с ней двоичные символы могут быть искажены независимо друг от друга и от ранее переданных символов [1, 8], что и характеризует данный канал как канал без памяти. Кроме того, символ «1» может быть искажён в символ «0» с той же вероятностью p , что и символ «0» в символ «1» (по этой причине канал является симметричным).

ДСКП отличается от ДСК тем, что согласно данной модели вероятность искажения произвольного символа зависит от последовательности из N ранее переданных символов, именуемых состоянием канала [8]. Само же число N называют памятью канала. В каждом из состояний S_i вероятность искажения p_i произвольного символа считается постоянной и не обязательно равной аналогичным вероятностям в других состояниях. Такой канал характеризуется матрицей вероятностей переходов из состояния S_i в состояние S_j , имеющей размерность $2^N \times 2^N$.

ДКГЭ является упрощением ДСКП. Так, считается, что при передаче каждого символа канал может находиться в одном из двух состояний: «хорошем» или «плохом» [2, 8]. Для такого канала определяются вероятности перехода из первого состояния во второе и

наоборот (P_{GB} и P_{BG} , соответственно). Если при передаче произвольного символа канал находится в «хорошем» состоянии, то вероятность искажения равна нулю. В случае пребывания канала в «плохом» состоянии вероятность искажения равна какому-то постоянному значению p_e .

Для разработки метода построения кода ПСКВ для исправления пачки ошибок будет использована модель ДКГЭ по причине того, что двум другим описанным моделям присущи существенные недостатки. ДСК, являясь простейшей моделью, достаточно неточно отражает свойства реальных каналов связи [1, 8], что делает данную модель непригодной в рассматриваемом контексте. В качестве недостатка ДСКП можно выделить её громоздкость. Так, например, при памяти канала $N = 10$, количество всех возможных состояний будет равно $2^N = 2^{10} = 1024$. Таким образом, модель ДКГЭ является некоторым компромиссом по отношению к остальным вариантам.

Перед переходом к рассмотрению кодов ПСКВ стоит рассмотреть модель ДКГЭ немного подробнее и обратить внимание на следующие её детали. Во-первых, при передаче произвольного символа, канал может как остаться в текущем состоянии, так и перейти в другое состояние. Таким образом, имеет смысл определить вероятности пребывания канала в «хорошем» и «плохом» состояниях (P_G и P_B , соответственно) во время передачи символа [2]:

$$P_G = \frac{P_{BG}}{P_{GB} + P_{BG}}, P_B = \frac{P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}}. \quad (1)$$

Во-вторых, упомянутая ранее вероятность искажения p_e произвольного символа распространяется только на случай пребывания канала в «плохом» состоянии. Поэтому для определения безусловной вероятности искажения p информационного символа необходимо использовать выражение (2) [8]:

$$p = p_e P_B = \frac{p_e P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}}. \quad (2)$$

Таким образом, на основании выражения (2) вероятность возникновения $p(M)$ пачки ошибок из M символов можно вычислить в соответствии с выражением (3):

$$p(M) = p^M = \left(\frac{P_e P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}} \right)^M. \quad (3)$$

В-третьих, для того, чтобы ограничить вероятность приёма сообщения, содержащего пачку ошибок, до некоторого допустимого значения P_A , необходимо исправлять пачку ошибок, максимальную длину M которой можно получить из выражения (4):

$$p(M) > P_A. \quad (3)$$

Решим данное неравенство относительно M . Используя выражение (3), перепишем выражение (4) в следующем виде:

$$\left(\frac{P_e P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}} \right)^M > P_A. \quad (4)$$

Извлекая из обеих частей неравенства десятичный логарифм и выполняя некоторые преобразования, получаем выражение (6):

$$M < \frac{\lg P_A}{\lg(P_e P_{GB}) - \lg(P_{GB} + P_{BG})}. \quad (5)$$

Неравенство (6) даёт оценку максимальной длине M пачки ошибок, которую необходимо исправлять для снижения вероятности приёма сообщения с пачкой ошибок до заданного значения P_A и ниже.

Так как число M является целым в виду своего смысла, выражение (6) можно переписать следующим образом:

$$M = \left\lfloor \frac{\lg P_A}{\lg(P_e P_{GB}) - \lg(P_{GB} + P_{BG})} \right\rfloor, \quad (6)$$

где $\lfloor x \rfloor$ – округление числа x вниз до ближайшего целого.

Перейдём к рассмотрению кодов ПСКВ. Данные коды представляют собой модулярные коды, формируемые при помощи набора из k оснований, являющихся неприводимыми полиномами $w_i(x)$ по модулю 2 [9]. Стоит отметить, что основания упорядочиваются по неубыванию степени, то есть $\deg w_1(x) \leq \deg w_2(x) \leq \dots \leq \deg w_k(x)$.

Данные основания составляют рабочий диапазон кода $W_k(x)$, вычисляемый согласно выражению (8):

$$W_k(x) = \prod_{i=1}^k w_i(x). \quad (7)$$

В кодовую комбинацию ПСКВ может быть преобразован любой двоичный полином $Y(x)$, удовлетворяющий выражению (9):

$$\deg Y(x) < \deg W_k(x). \quad (8)$$

Кодовая комбинация ПСКВ для полинома $Y(x)$ представляет собой набор из k остатков $y_1(x), y_2(x), \dots, y_k(x)$, определяемых согласно выражению (10):

$$y_i(x) = Y(x) \bmod w_i(x), i = 1 \dots k. \quad (9)$$

Обратное преобразование осуществляется за счёт использования ортогональных базисов согласно выражению (11):

$$Y(x) = \sum_{i=1}^k (y_i(x) B_i(x)) + R_Y(x) W_k(x), \quad (10)$$

где $B_i(x) = m_i(x) \frac{W_k(x)}{w_i(x)}$ – i -ый ортогональный базис с весом $m_i(x)$, $R_Y(x)$ – ранг полинома в ПСКВ.

Обнаружение и исправление ошибок кодом ПСКВ возможно за счёт внесения избыточности путём добавления r контрольных оснований $w_{k+1}(x), w_{k+2}(x), \dots, w_{k+r}(x)$, причём полученный набор из $n = k + r$ оснований также должен соответствовать упомянутому выше условию упорядоченности по неубыванию степени [4]. В данном случае k оснований, которые присутствовали в наборе до внесения избыточности, называют информационными.

Известно [10], что если основания упорядочены указанным образом, то минимальное кодовое расстояние модулярного кода (в частности, кода ПСКВ) составляет $d_{\min} = r + 1$. Таким образом, основываясь на известном факте теории кодирования [1], можно сделать вывод о том, что код ПСКВ способен исправлять любую ошибку кратности

$$t = \left\lfloor \frac{r}{2} \right\rfloor \quad (11)$$

и менее (любые искажения не более t остатков кодовой комбинации).

При внесении избыточности в код ПСКВ рабочий диапазон расширяется до полного диапазона $W_n(x)$ согласно выражению (13):

$$W_n(x) = \prod_{i=1}^n w_i(x) = W_k(x) \prod_{i=k+1}^n w_i(x) = W_k(x)W_r(x). \quad (12)$$

В данном случае кодовые комбинации разделяются на разрешённые и запрещённые. Первые удовлетворяют неравенству (9), а вторые – неравенству (14):

$$\deg W_k(x) \leq \deg Y^*(x) < \deg W_n(x), \quad (13)$$

где $Y^*(x)$ – полином, представляющий запрещённую комбинацию.

Для коррекции ошибки существуют различные алгоритмы, основанные на применении различных позиционных характеристик кодовой комбинации, что показано в работах [3, 4, 5].

Прежде чем приступить к разработке желаемого метода, условимся, что кодовые комбинации ПСКВ передаются по каналу следующим образом. После преобразования остатков-полиномов в двоичные числа к каждому полученному числу добавляется такое количество ведущих нулей, чтобы каждое из них содержало ровно $l = \deg w_n(x)$ двоичных цифр.

$$t = \left\lceil \frac{M}{l} \right\rceil + \left\lceil \frac{|M-1|_l^+ + l - 1}{l} \right\rceil = \left\lceil \frac{M}{l} \right\rceil + \left\lceil \frac{|M-1|_l^+ - 1}{l} \right\rceil + 1, \quad (14)$$

где $\lceil x \rceil$ – округление числа x вверх до ближайшего целого.

Первое слагаемое выражения (15) показывает минимальное количество блоков, которое захватывает рассматриваемая пачка ошибок, что достижимо в ситуации, когда она начинает своё воздействие с самого первого символа какого-либо блока. Второе слагаемое (в варианте записи с двумя слагаемыми) пока-

затем полученные двоичные числа по очереди передаются по каналу связи. Это позволит принимающей стороне однозначно определять, когда заканчивается передача текущего остатка и начинается передача следующего. Таким образом, для передачи кодовой комбинации ПСКВ по двоичному каналу потребуется передать $L = nl$ двоичных символов. Условимся в дальнейшем называть данный процесс передачей n блоков по l символов.

Для построения помехоустойчивого кода ПСКВ необходимо определить максимальную кратность t исправляемых ошибок. Чтобы определить значение t , требуется определить, какое максимальное количество передаваемых блоков может быть затронуто одной пачкой ошибок длиной M . Анализируя все возможные варианты размещения пачки ошибок длиной M в n блоках по l символов, получаем выражение (15):

зывает максимальное количество дополнительно захватываемых пачкой ошибок блоков, что достигается в случае, когда она воздействует, начиная с самого последнего символа какого-либо блока.

Благодаря выражениям (12) и (15) становится возможным вычислить количество r контрольных оснований, которые необходимо добавить в код ПСКВ:

$$r = 2t = 2 \left\lceil \frac{M}{l} \right\rceil + 2 \left\lceil \frac{|M-1|_l^+ - 1}{l} \right\rceil + 2. \quad (15)$$

На основании всех приведённых фактов и расчётов становится возможным формулирование метода построения помехоустойчивого кода ПСКВ для исправления пачки ошибок в ДКГЭ с обеспечением заданной допустимой вероятности приёма сообщения с пачкой ошибок. Метод состоит из следующего набора шагов.

1. Для исследуемого двоичного канала составляется модель ДКГЭ (определяются параметры P_{GB}, P_{BG}, p_e).

2. Задаётся значение допустимой вероятности P_A приёма сообщения, содержащего пачку ошибок.

3. В соответствии с выражением (7) определяется максимальная длина M пачки ошибок, которую необходимо исправлять.

4. Выбираются информационные основания $w_i(x)$ и их количество k таким образом, чтобы полученный код ПСКВ был способен кодировать все возможные полиномы, которые могут передаваться по каналу связи. Основания упорядочиваются по неубыванию их степеней.

5. Выбирается длина блока l , удовлетворяющая условию $l \geq \deg w_k(x)$. В данном случае значение l также можно интерпретировать как максимальную степень контрольных оснований, которые необходимо будет выбрать позже.

6. В соответствии с выражением (16) определяется количество r контрольных оснований, которые необходимо добавить в код ПСКВ для исправления пачки ошибок длины M .

7. Выбираются r контрольных оснований $w_{k+1}(x), w_{k+2}(x), \dots, w_{k+r}(x)$, степень каждого из которых находится на отрезке $[\deg w_k(x), l]$. Если такой выбор невозможен (недостаточно неприводимых полиномов по модулю 2, ещё не выбранных в качестве оснований и

имеющих нужную степень), необходимо увеличить l на единицу и вернуться к шагу 6.

Таким образом, после выполнения всех описанных шагов разработанного метода получаем помехоустойчивый код ПСКВ, удовлетворяющий заданным требованиям.

Результаты

Рассмотрим процесс реализации разработанного метода на конкретном примере. Предположим, что имеется канал связи, соответствующий модели ДКГЭ с параметрами $P_{GB} = 0,3, P_{BG} = 0,6, p_e = 0,5$. Зададим допустимую вероятность приёма сообщения с пачкой ошибкой как $P_A = 10^{-5}$. Вычислим максимальную длину M пачки ошибок, которую необходимо исправлять:

$$M = \left\lceil \frac{\lg 10^{-5}}{\lg(0,5 \cdot 0,3) - \lg(0,3 + 0,6)} \right\rceil = 6.$$

Предположим, что по каналу связи необходимо передавать все возможные полиномы, степень которых меньше или равна 13. Пользуясь таблицей неприводимых многочленов, представленной в [11], и основываясь на требовании к степени рабочего диапазона кода ПСКВ, в качестве информационных оснований выберем полиномы

$$w_1(x) = x^3 + x + 1, w_2(x) = x^3 + x^2 + 1, w_3(x) = x^4 + x^3 + 1, w_4(x) = x^4 + x^3 + x^2 + x + 1.$$

Далее выбираем длину блока $l = 5 > \deg w_4(x)$. Получаем следующее необходимое количество r контрольных оснований кода ПСКВ:

$$r = 2 \left\lceil \frac{6}{5} \right\rceil + 2 \left\lceil \frac{|6-1|_5^+ - 1}{5} \right\rceil + 2 = 2 \cdot 2 + 2 \cdot (-1) + 2 = 4.$$

На основе полученного значения r и выбранного значения l (ограничивающего максимальную степень) в качестве контрольных оснований выберем полиномы

$$w_5(x) = x^5 + x^2 + 1, w_6(x) = x^5 + x^4 + 1, w_7(x) = x^5 + x^3 + x^2 + x + 1, w_8(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

Таким образом, получаем помехоустойчивый код ПСКВ с четырьмя информационными и четырьмя контрольными основаниями, способный исправлять двукратную ошибку.

Рассмотрим возможность исправления пачки ошибок длиной $M = 6$. Предположим, что необходимо передать полином $Y(x) = x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$. Производя деление с остатком на все основания кода ПСКВ, получаем кодовую комбинацию $Y(x) = \{x, x^2 + x, x^2, 1, x^4 + x + 1, x^4 + x^2, x^4 + x^3 + x^2 + x, x^4 + x^3\}$. При её передаче 8 блока-

ми по 5 бит получаем следующее 40-битное сообщение:

$$Y = 00010 | 00110 | 00100 | 00001 | 10011 | 10100 | 11110 | 11000.$$

Допустим, что сообщение было искажено таким образом, что была получена пачка ошибок длиной 6, начиная с первого символа второго блока:

$$Y^* = 00010 | \overline{11001} | 10100 | 00001 | 10011 | 10100 | 11110 | 11000.$$

В виду того, что искажены два блока, принимающая сторона в результате обработки полученного сообщения получит полином с двумя искажёнными основаниями. Однако в построенном коде ПСКВ используется 4 контрольных основания, что позволит исправить

данную двукратную ошибку.

Допустим, что сообщение было искажено таким образом, что была получена пачка ошибок длиной 6, начиная с последнего символа третьего блока:

$$Y^* = 00010 | 00110 | 00101 | \overline{11110} | 10011 | 10100 | 11110 | 11000.$$

Рассуждая аналогичным образом, приходим к выводу о том, что принимающая сторона имеет возможность исправить возникшую ошибку.

Таким образом, код ПСКВ, построенный в соответствии с разработанным методом, действительно способен исправлять пачки ошибок заявленной длины, что соответствует ожидаемому результату.

Заключение

В данной статье были рассмотрены вопросы помехоустойчивого кодирования кодами полиномиальной системы классов вычетов. В процессе разработки метода построения таких кодов были изучены такие модели двоичных каналов как двоичный симметричный канал без памяти, двоичный симметричный канал с памятью и двоичный канал Гильберта-Эллиота. Последняя из них была выбрана в

качестве наиболее пригодной для выполнения поставленной задачи. При рассмотрении кодов полиномиальной системы классов вычетов был дан обзор их математическому аппарату и корректирующим свойствам.

На основе изложенного материала был разработан метод построения помехоустойчивого кода полиномиальной системы классов вычетов, позволяющий исправлять пачки ошибок и обеспечивающий заданное значение допустимой вероятности приёма сообщения, содержащего пачки ошибок. Для демонстрации и подтверждения корректности разработанного метода был приведён и рассмотрен соответствующий пример. Таким образом, был получен метод построения кодов полиномиальной системы классов вычетов, открывающий возможность их использования не только для решения прикладных задач, но и для передачи данных по каналу связи.

Библиографический список

1. Касами Т., Токура Н., Ивадари Ё., Инагаки Я. Теория кодирования: перевод с японского. М.: Мир, 1973. 576 с.
2. Мальцев Г.Н., Джумков В.В. Обобщенная модель дискретного канала передачи информации с группированием ошибок // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 27-33.
3. Чистоусов Н.К., Калмыков И.А., Духовный Д.В., Калмыкова Н.И. Модификация алгоритма коррекции ошибок, возникающих в процессе работы системы аутентификации спутника // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4. С. 252-269.
4. Белов С.П., Саркисов А.Б., Абакумова А.М., Калмыков И.А., Ряднов С.А. Разработка метода коррекции ошибки на основе использования многоверсионной избыточности модулярных кодов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11. С. 198-202.

5. Чистоусов Н.К., Духовный Д.В., Чайков С.С. Алгоритм поиска и коррекции ошибок в избыточных кодах ПСКВ для системы опознавания спутника // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2022): труды 24-ой межд. конф. М., 2022. С. 104-107.
6. Гапочкин А.В., Барбарян В.Г., Калмыков М.И., Мартиросян А.Г. Применение операции расширения системы оснований модулярного кода для обнаружения и коррекции ошибки // Успехи современного естествознания. 2014. № 11. С. 56-58.
7. Чистоусов Н.К., Калмыков И.А., Духовный Д.В., Калмыкова Н.И., Емельянов Е.А. Модификация метода аутентификации низкоорбитальных спутников на основе кодов полиномиальной системы классов вычетов // Современные наукоёмкие технологии. 2022. № 2. С. 164-169.
8. Марков М.В. Модели дискретных каналов связи // Сервис в России и за рубежом. 2011. № 1 (20). С. 143-156.
9. Kalmykov, I.A.; Pashintsev, V.P.; Tyncherov, K.T.; Olenev, A.A.; Chistousov, N.K. Error-Correction Coding with Usage of Polynomial Residue Number System. Applied Sciences 2022, 12, 3365. <https://doi.org/10.3390/app12073365>.
10. Хери Али Абдуллах, Краснобаев В.А., Замула А.А., Дейнеко Ж.В., Зефирова О.В. Метод коррекции ошибки в системе обработки цифровой информации, функционирующей в модулярной арифметике // Прикладная радиоэлектроника. 2008. Т. 7., № 3. С. 308-312.
11. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля: перевод с английского. М.: Мир, 1988. 822 с.

Referenses

1. Kasami T., Tokura N., Iwadari Yo., Inagaki Ya. Teoriya kodirovaniya: perevod s yaponskogo. M.: Mir, 1973. 576 s.
2. Mal'cev G.N., Dzhumkov V.V. Obobshchennaya model' diskretnogo kanala peredachi informacii s gruppirovaniem oshibok // Informacionno-upravlyayushchie sistemy. 2013. № 1. S. 27-33.
3. Chistousov N.K., Kalmykov I.A., Duhovnyj D.V., Kalmykova N.I. Modifikaciya algoritma korrek-cii oshibok, vznikayushchih v processe raboty sistemy autentifikacii sputnika // Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 4. S. 252-269.
4. Belov S.P., Sarkisov A.B., Abakumova A.M., Kalmykov I.A., Ryadnov S.A. Razrabotka metoda korrek-cii oshibki na osnove ispol'zovaniya mnogoversionnoj izbytochnosti modulyarnyh kodov // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy. 2016. № 11. S. 198-202.
5. Chistousov N.K., Duhovnyj D.V., Chajkov S.S. Algoritm poiska i korrek-cii oshibok v izbytochnyh kodah PSKV dlya sistemy opoznaniya sputnika // Cifrovaya obrabotka signalov i eyo primeneniye (DSPA-2022): trudy 24-oj mezhd. konf. M., 2022. S. 104-107.
6. Gapochkin A.V., Barbaryan V.G., Kalmykov M.I., Martirosyan A.G. Primeneniye operacii rasshire-niya sistemy osnovanij modulyarnogo koda dlya obnaruzheniya i korrek-cii oshibki // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2014. № 11. S. 56-58.
7. Chistousov N.K., Kalmykov I.A., Duhovnyj D.V., Kalmykova N.I., Emel'yanov E.A. Modifikaciya metoda autentifikacii nizkoorbital'nyh sputnikov na osnove kodov polinomial'noj sistemy klassov vychetov // Sovremennye naukoymkie tekhnologii. 2022. № 2. S. 164-169.
8. Markov M.V. Modeli diskretnyh kanalov svyazi // Servis v Rossii i za rubezhom. 2011. № 1 (20). S. 143-156.
9. Kalmykov, I.A.; Pashintsev, V.P.; Tyncherov, K.T.; Olenev, A.A.; Chistousov, N.K. Error-Correction Coding with Usage of Polynomial Residue Number System. Applied Sciences 2022, 12, 3365. <https://doi.org/10.3390/app12073365>.
10. Heri Ali Abdullah, KrasnobaeV.A., Zamula A.A., Dejneko ZH.V., Zefirova O.V. Metod korrek-cii oshibki v sisteme obrabotki cifrovoj informacii, funkcioniruyushchej v modulyarnoj arifmetike // Prikladnaya radi-oelektronika. 2008. Т. 7., № 3. S. 308-312.
11. Lidl R., Niderrajter G. Konechnye polya: perevod s anglijskogo. M.: Mir, 1988. 822 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 11.11.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 23.11.2022

Принята к публикации / Accepted 27.11.2022

© И.А. Калмыков, Д.В. Духовный, 2023

Сведения об авторах
List of Authors

Калмыков Игорь Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности автоматизированных систем Института цифрового развития Северо-Кавказского федерального университета.

Igor Kalmykov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security of Automated Systems, Institute for Digital Development, North Caucasus Federal University.

Духовный Даниил Вячеславович – студент Института цифрового развития Северо-Кавказского федерального университета.

Daniil Dukhovny – Student, Institute for Digital Development, North Caucasus Federal University.

Ссылка для цитирования: *Калмыков И.А., Духовный Д.В.* Метод построения помехоустойчивого кода полиномиальной системы классов вычетов, обеспечивающий допустимую вероятность ошибочного приёма в канале связи // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 1. С. 15 - 22. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-15-22.

For citation: *Kalmykov I.A., Dukhovny D.V.* A method for constructing an error-correcting code of a polynomial system of residue classes that provides an acceptable probability of erroneous reception in a communication channel // Scientific researches: results and prospects. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 15 - 22. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-15-22.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СИСТЕМЫ «КАРБИД КРЕМНИЯ-КАРБИД НИОБИЯ», ПОЛУЧЕННОЙ СПЕКАНИЕМ БЕЗ ДАВЛЕНИЯ

Ш.Ш. Шабанов¹, Г.Д. Кардашова²

¹ Дагестанский государственный университет, Махачкала
367000, Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а

² Дагестанский государственный технический университет, Махачкала
367026, Россия, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70
sh-shaban@yandex.ru, gulya-ka11@yandex.ru

Аннотация. Получена керамика из порошков различных пропорций карбида кремния и карбида ниобия спеканием без давления в среде аргона при температурах 1900°C и 2200°C. Определены плотность и пористость керамики SiC–NbC, проведены рентгеноструктурные измерения. Выяснено, что в процессе спекания фазовые переходы не происходят и новые соединения не образуются. Теплопроводность керамики SiC–NbC была определена по результатам измерения плотности, температуропроводности и теплоемкости. Установлено, что с ростом температуры и весовых отношений карбида кремния в составе керамики теплопроводность уменьшается.

Ключевые слова: карбид кремния, карбид ниобия, керамика, твердый раствор, теплопроводность.

Abstract. Ceramics was obtained from powders of various proportions of silicon carbide and niobium carbide by sintering without pressure in argon at temperatures of 1900°C and 2200°C. The density and porosity of SiC–NbC ceramics were determined, and X-ray diffraction measurements were carried out. It was found that no phase transitions occur during sintering and no new compounds are formed. The thermal conductivity of SiC–NbC ceramics was determined from measurements of density, thermal diffusivity, and heat capacity. It has been established that with an increase in temperature and weight ratios of silicon carbide in the composition of ceramics, the thermal conductivity decreases.

Key words: silicon carbide, niobium carbide, ceramics, solid solution, thermal conductivity.

Введение

Керамика на основе карбида кремния обладает высокой механической прочностью, теплопроводностью, термостойкостью и низким коэффициентом теплового расширения. Благодаря сочетанию таких свойств, керамика SiC уже находит широкое применение во многих отраслях машиностроения, микроэлектронике и конструкциях, где имеются высокие температуры [1, 2, 3]. Интерес представляет введение в карбид кремния добавок карбидов переходных металлов (титан, нио-

бий, цирконий). Добавление к карбиду кремния карбидов переходных металлов позволяет улучшить механические свойства и получить керамические материалы на основе карбида кремния с различной теплопроводностью, электропроводностью в диапазоне от металлической до полупроводниковой [4, 5, 6]. В частности, для улучшения механических свойств карбидокремниевой керамики к нему добавляют NbC, что приводит к росту трещиностойкости до 5,4 МПа·м^{1/2} и твердости по Виккерсу 17,8 ГПа [7]. Ранее ав-

торы проводили исследования с введением в SiC карбида ниобия с возможностью управлять электрофизическими параметрами такой системы [8, 9, 10]. С целью установления связи «структура-свойства» были проведены дополнительные исследования влияния структуры и режимов спекания керамики SiC–NbC на теплопроводность при различных весовых отношениях NbC.

Экспериментальные исследования и обсуждение

Керамика SiC–NbC была получена спеканием при температурах 1900°C и 2200°C в атмосфере Ar в течении 1 часа. Использовался порошок SiC (зеленый) политаипа 6H.

Порошки SiC и NbC дисперсностью 5 мкм смешивали в шаровой мельнице. Количество порошка SiC и NbC составляло: SiC (10% масс.) - NbC (90% масс.), SiC (30% масс.) - NbC (70% масс.), SiC (50% масс.) - NbC (50% масс.), SiC (70% масс.) - NbC (30% масс.), SiC (90% масс.) - NbC (10% масс.). Плотность и пористость полученных образцов керамики SiC–NbC определяли методом заполнения и гидростатического взвешивания. Данные по плотности и пористости для керамики SiC–NbC представлены в таблице 1. Видно, что плотность образцов возрастает от $1,68 \cdot 10^3$ до $5,23 \cdot 10^3$ кг/м³ с увеличением содержания NbC от 10 до 90% вес., а пористость уменьшается.

Таблица 1 – Плотность и пористость керамики SiC–NbC

№ п/п	Температура получения, К	Состав, NbC %	Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	Пористость П, %
1	2373	10	1,68	53,7
2	2373	30	1,82	53,4
3	2373	50	2,29	52,4
4	2473	70	3,39	38
5	2373	90	5,23	17

Структуру полученных керамических материалов SiC–NbC изучали по интегральной интенсивности рентгеновского излучения на порошковом дифрактометре модели *Empyrean series 2* фирмы *PANalytical* (напряжение на рентгеновской трубке в режиме U = 40 кВ, I = 30 мА) и сканирующем электронном микроскопе «ASPEX» *PSEMeXpress™*. Фильтр никелевый, трубка медная (Cu), 2 θ – геометрия.

Температуропроводность измерялась методом лазерной вспышки (*LFA 457 MicroFlach*),

Обзорные рентгенограммы были сняты в интервале брегговских углов $2\theta = 15^\circ \div 40^\circ$, с вращением образца, при максимальных режимах работы рентгеновской трубки и в наиболее чувствительном диапазоне измерения интенсивности отражений.

На рентгенограммах наблюдаются все линии, соответствующие рентгеновским спек-

трам как карбида кремния, так и карбида ниобия (сравнение с табличными данными по картотеке *ASTM*). Других линий, свидетельствующих об образовании новой фазы обнаружено не было. Для оценки межплоскостных расстояний $d(3,0,0)$ и $d(00,18)$ была проведена съемка в интервале углов $2\theta = 59^\circ \div 60^\circ$ и $2\theta = 66^\circ \div 68^\circ$. Межплоскостные расстояния рассчитаны по положениям линии для длин волн $\lambda_{\alpha 1}$ и $\lambda_{\alpha 2}$ отдельно. Погрешность в измерении $d(3,00)$ и $d(00,18)$ составляла $\pm 0,00004$ Å и $\pm 0,00003$ Å соответственно. Результаты измерений приведены в таблице 2 и рисунке 1.

Кроме того, на рентгенограммах наблюдаются отдельные слабые рефлексы, не повторяющиеся для образцов различного состава.

Таблица 2 – Рентгеноструктурные измерения керамики SiC–NbC

№	NbC, %	I съёмка		II съёмка	
		d(3,00)	d(00,18)	d(3,00)	D(00,18)
1	0	$d_{\alpha 1}=0,8887$	$d_{\alpha 1}=0,8379$	$D_{\alpha 1}=0,8887$	$d_{\alpha 1}=0,8389$
		$d_{\alpha 2}=0,8883$	$d_{\alpha 2}=0,8378$	$D_{\alpha 2}=0,8884$	$d_{\alpha 2}=0,8392$
2	10	$d_{\alpha 1}=0,8881$	$d_{\alpha 1}=0,8386$	$D_{\alpha 1}=0,8881$	$d_{\alpha 1}=0,8389$
		$d_{\alpha 2}=0,8893$	$d_{\alpha 2}=0,8386$	$D_{\alpha 2}=0,8390$	$d_{\alpha 2}=0,8388$
3	30	$d_{\alpha 1}=0,8832$	$d_{\alpha 1}=0,8383$	$D_{\alpha 1}=0,8891$	$d_{\alpha 1}=0,8383$
		$d_{\alpha 2}=0,8895$	$d_{\alpha 2}=0,8387$	$D_{\alpha 2}=0,8890$	$d_{\alpha 2}=0,8387$
4	50	$d_{\alpha 1}=0,8897$	$d_{\alpha 1}=0,8385$	$D_{\alpha 1}=0,8853$	$d_{\alpha 1}=0,8385$
		$d_{\alpha 2}=0,8895$	$d_{\alpha 2}=0,8381$	$D_{\alpha 2}=0,8851$	$d_{\alpha 2}=0,8385$
5	70	$d_{\alpha 1}=0,8885$	$d_{\alpha 1}=0,8381$	$D_{\alpha 1}=0,8889$	$d_{\alpha 1}=0,8389$
		$d_{\alpha 2}=0,8892$	$d_{\alpha 2}=0,8380$	$D_{\alpha 2}=0,8890$	$d_{\alpha 2}=0,8384$
6	90	$d_{\alpha 1}=0,8887$	$d_{\alpha 1}=0,8384$	$D_{\alpha 1}=0,8880$	$d_{\alpha 1}=0,8388$
		$d_{\alpha 2}=0,8893$	$d_{\alpha 2}=0,8382$	$D_{\alpha 2}=0,8891$	$d_{\alpha 2}=0,8382$

При анализе угловых положений этих линий их не удается идентифицировать как линии, принадлежащие какому-либо соединению типа NbC , SiC_4 , Nb_3Si_4 , $NbSi_2$, Si_3Nb_5 . Из рентгенограмм видно, что с изменением содержания карбида ниобия интенсивность линий, соответствующих SiC , уменьшается, а интенсивность линий, соответствующих NbC — возрастает. При увеличении содержания карбида ниобия более 30% масс. происходит стабилизация политапа $3C\ SiC$ (рисунок 2).

Идентифицированные линии от образца к образцу не воспроизводятся. Поскольку никаких дополнительных линий, свидетельст-

вующих об образовании новой фазы не обнаружено, то из анализа рентгенограмм керамики $SiC-NbC$ различного состава можно заключить, что в процессе спекания при температурах $1900^{\circ}C$ и $2200^{\circ}C$ фазовые переходы не происходят и новые соединения не образуются.

Исследование структурных параметров «а» и «с» элементарной ячейки SiC проводилось при двукратной съёмке каждого образца и при определении параметров по $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ в отдельности с последующим усреднением.

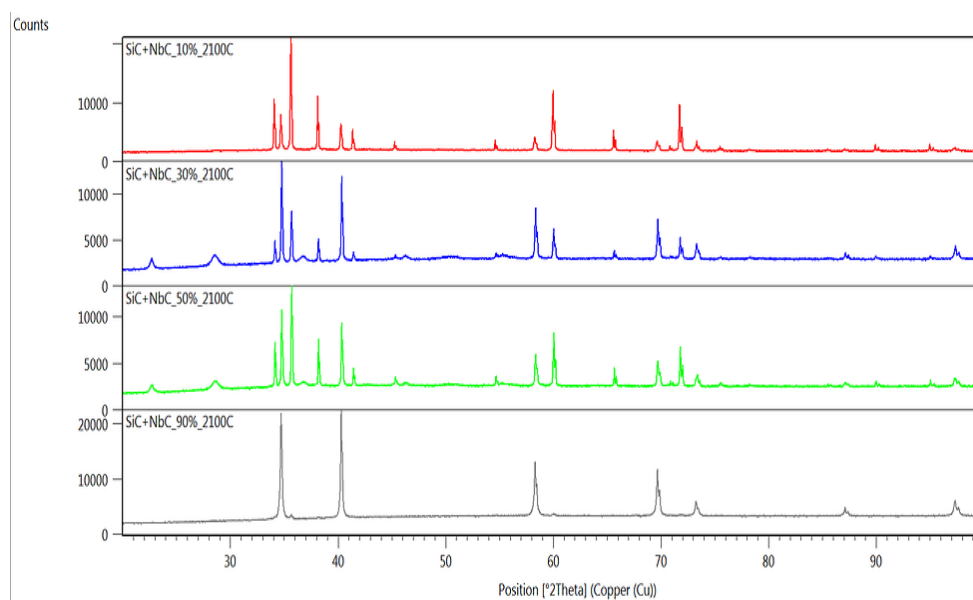


Рисунок 1 – Рентгенограмма керамики $SiC-NbC$ различного состава

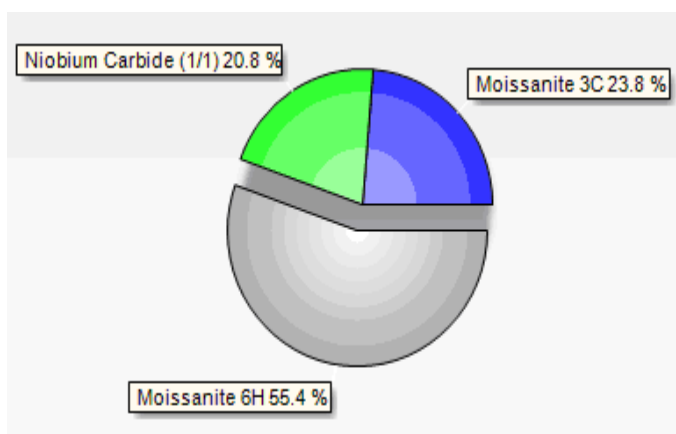


Рисунок 2 – Фазовый анализ керамики SiC-NbC состава 50% вес. NbC

Полученные результаты приведены на рисунке 3. Видно, что как для керамики SiC-NbC, спеченной при 1900°C, так и полученной при 2200°C с ростом содержания NbC параметр «с» уменьшается. Значение параметра «а» в обоих случаях остается приблизительно одинаковым. Изменение параметра «с» предполагает частичное замещение атомов кремния атомами Nb в тетраэдрах.

Кроме смещения дифракционных линий, связанных с изменением параметров элементарной ячейки, на серии рефлексов (00.18) от

образцов, спеченных при 2200°C наблюдается anomalous распределение интенсивности, которое проявляется в соотношениях $J_{K_{\alpha 1}}$ и $J_{K_{\alpha 2}}$.

Интенсивности линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ в K_{α} -дублете (теоретические и экспериментальные) относятся как 2:1. Это соотношение связано с энергетическими переходами, имеющими место при формировании характеристического рентгеновского излучения.

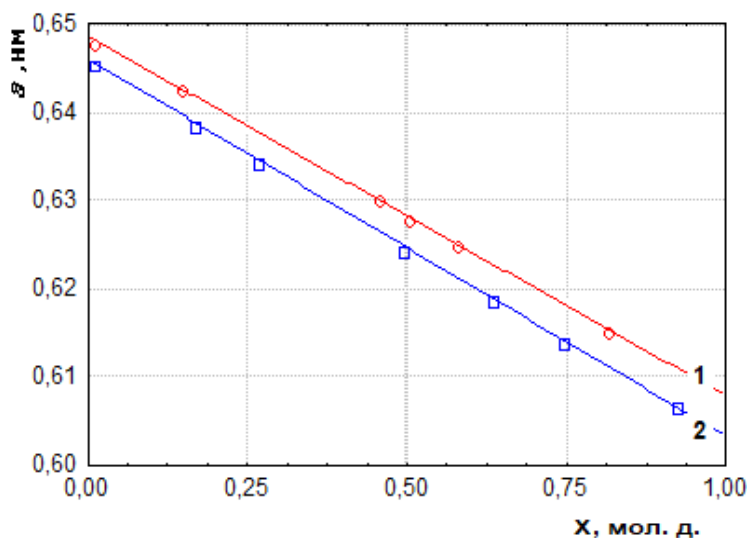


Рисунок 3 – Изменение параметра «с» элементарной решетки в твердых растворах SiC-NbC с изменением содержания Nb: 1– керамика, спеченная при 1900°C; 2 – керамика, спеченная при 2200°C

На рисунке 4 представлены экспериментальные данные температурной зависимости теплопроводности керамики SiC-NbC различного состава (10-90 % масс.) карбида ниобия. Теплопроводность керамики SiC-NbC была определена по результатам измерения плотности, температуропроводности и тепло-

емкости. Видно, что с ростом температуры и доли карбида кремния в составе керамики ее теплопроводность уменьшается. Для состава SiC+90% вес. NbC наблюдается некоторый рост и эта кривая выделяется из общей тенденции.

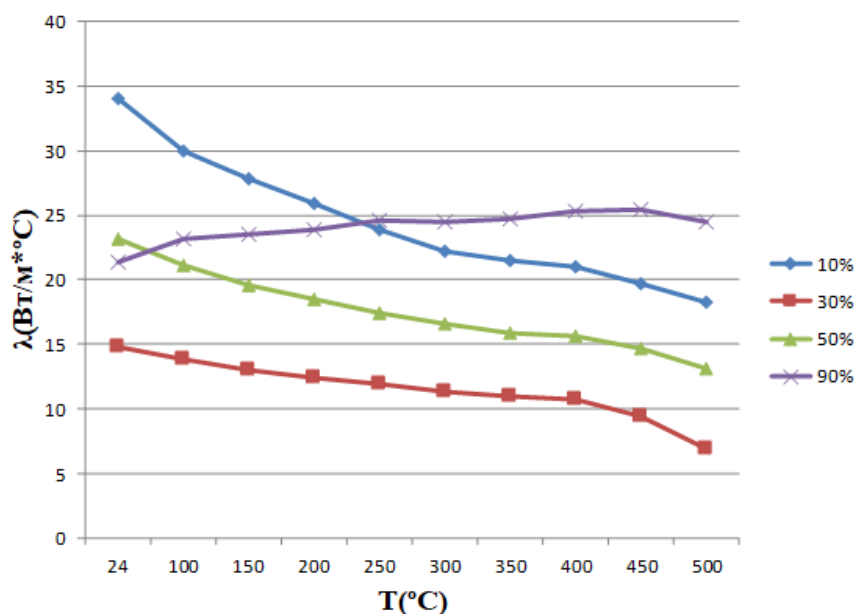


Рисунок 4 –
Теплопроводность
керамики SiC-NbC

Заключение

Анализ рентгенограмм керамики SiC-NbC разного состава показал, что в процессе спекания при температурах 1900°C и 2200°C фазовые переходы не происходят и новые соединения не образуются. С изменением

состава в керамике, спеченной при 2200°C, меняется параметр решетки, что свидетельствует об образовании твердого раствора.

Показано, что увеличение доли SiC в составе керамики приводит к уменьшению ее теплопроводности.

Библиографический список

1. Кардашова Г.Д., Шабанов Ш.Ш., Микаилов М.М., Дибиргаджиев Д.Ш. Исследование структурных особенностей поверхности излома керамики на основе SiC-AlN и ее свойств // Научные исследования: итоги и перспективы. 2022. Т. 3, № 3. С. 28 - 35.
2. Шестаков А.М. Волокна карбида кремния и нитевидные кристаллы для композиционных материалов с керамической матрицей (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 8. С. 51-63.
3. Ильющенко А.Ф., Дьячкова Л.Н., Осипов В.А. Сложнопрофильные элементы аэрокосмической техники из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2020. Т. 64. № 6. С. 730-738.
4. Житнюк С.В. Влияние спекающих добавок на свойства керамики на основе карбида кремния (обзор) // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». Композиционные материалы. 2019. № 3 (75). С. 81–85.
5. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М.: «Металлургия», 1977. 216 с.
6. Сафаралиев Г.К., Шабанов Ш.Ш., Билалов Б.А., Садыков С.А. Структура и электропроводность керамики SiC-NbC // Вестник Дагестанского государственного университета. 2011. Вып. 6. С. 31-34.
7. Frajkorova F., Hnatko M., Lencses Z., Sajgalik P., J. of the Eur.Cer. Soc., 32. 2012. P. 2513-2518.
8. Шабанов Ш.Ш., Кардашова Г.Д. Структура и температуропроводность керамики SiC-NbC // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1005. P. 012017.
9. Офицерова Н.В., Шабанов Ш.Ш., Сафаралиев Г.К., Савина В.И. Исследование структуры карбид-кремниевой керамики с добавками NbC // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер.: Естественные науки. 2008. Вып. 6. С. 34–37.
10. Офицерова Н.В., Шабанов Ш.Ш., Ахмедханов А.А. Особенности электрических свойств карбид-кремниевой керамики с добавками карбида ниобия // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1: Естественные науки. 2021. Т. 36. № 3. С. 29-36.

Referenses

1. Kardashova G.D., Shabanov Sh.Sh., Mikailov M.M., Dibirgadzhev D.Sh. Issledovanie strukturnykh osobennostey poverhnosti izloma keramiki na osnove SiC-AIN i ee svoystv // Nauchnye issledovaniya: itogi i perspektivy. 2022. T. 3, № 3. S. 28 - 35.
2. Shestakov A.M. Volokna karbida kremniya i nitevidnye kristally dlya kompozitsionnykh materialov s keramicheskoy matritsej (obzor) // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2021. T. 87. № 8. S. 51-63.
3. Il'yushchenko A.F., D'yachkova L.N., Osipov V.A. Slozhnoprofil'nye elementy aerokosmicheskoy tekhniki iz reakcionnospechennoj karbidokremnievoj keramiki // Doklady Nacional'noj akademii nauk Be-larusi. 2020. T. 64. № 6. S. 730-738.
4. Zhitnyuk S.V. Vliyaniye spekeyushchih dobavok na svoystva keramiki na osnove karbida kremniya (obzor) // Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Trudy VIAM». Kompozitsionnye materialy. 2019. № 3 (75). S. 81–85.
5. Gnesin G.G. Karbidokremnievye materialy. M.: «Metallurgiya», 1977. 216 s.
6. Safaraliev G.K., Shabanov Sh.Sh., Bilalov B.A., Sadykov S.A. Struktura i elektroprovodnost' keramiki SiC-NbC // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. Vyp. 6. S. 31-34.
7. Frajkorova F., Hnatko M., Lences Z., Sajgalik P., J. of the Eur.Cer. Soc., 32. 2012. R. 2513-2518.
8. Shabanov Sh.Sh., Kardashova G.D. Struktura i temperaturoprovodnost' keramiki SiC–NbC // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1005. P. 012017.
9. Oficerova N.V., Shabanov Sh.Sh., Safaraliev G.K., Savina V.I. Issledovanie struktury karbid-kremnievoj keramiki s dobavkami NbC // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki. 2008. Vyp. 6. S. 34–37.
10. Oficerova N.V., Shabanov Sh.Sh., Ahmedhanov A.A. Osobennosti elektricheskikh svoystv karbid-kremnievoj keramiki s dobavkami karbida niobiya // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 1: Estestvennye nauki. 2021. T. 36. № 3. S. 29-36.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 23.12.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 19.01.2023

Принята к публикации / Accepted 22.01.2023

© Ш.Ш. Шабанов, Г.Д. Кардашова, 2023

Сведения об авторах

List of Authors

Шабанов Шабан Шафиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной физики Дагестанского государственного университета.

Shaban Shabanov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Physics, Daghestan State University.

Кардашова Гюльнара Дарвиновна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники Дагестанского государственного технического университета.

Gulnara Kardashova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics, Daghestan State Technical University.

Ссылка для цитирования: *Шабанов Ш.Ш., Кардашова Г.Д.* Анализ структуры и свойств системы «карбид кремния-карбид ниобия», полученной спеканием без давления // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 1. С. 23 - 28. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-23-28.

For citation: *Shabanov Sh.Sh., Kardashova G.D.* Analysis of the structure and properties of the «silicon carbide-niobium carbide» system obtained by sintering without pressure // Scientific researches: results and prospects. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 23 - 28. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-23-28.

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ СО СПЕКТРОМ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ВЫРАЩЕННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ВТОРОГО ТИПА CdS/ZnSe

Н.Р. Юнусова^{1,2}, В.И. Козловский^{1,2}, М.Р. Бутаев², Я.К. Скасырский²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

119991, ГСП-1, Россия, Москва, Ленинский проспект, д.53

naida.yunusova1994@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты моделирования наноразмерной гетероструктуры 2-го типа CdS/ZnSe при различных уровнях возбуждения и при низкой температуре ($T \approx 10$ К). Проведено сравнение расчетных спектров линий усиления с линиями люминесценции выращенной методом MOCVD гетероструктуры с аналогичными толщинами слоев квантовой ямы.

Ключевые слова: гетероструктура 2-го типа CdS/ZnSe, зонная диаграмма, интеграл перекрытия, катодолюминесценция, квантовая яма, полупроводниковый дисковый лазер.

Abstract. The results of simulation of a type 2 nanosized CdS/ZnSe heterostructure at various excitation levels and at low temperatures ($T \approx 10$ K) are presented. The calculated gain line spectra are compared with the luminescence lines of a MOCVD-grown heterostructure with similar quantum-well layer thicknesses.

Key words: type 2 CdS/ZnSe heterostructure, band diagram, overlap integral, cathodoluminescence, quantum well, semiconductor disk laser.

Интенсивное развитие полупроводниковых дисковых лазеров связано с высокой мощностью излучения (~1-100 Вт), широким спектральным диапазоном длин волн (~УФ-ТГц), высоким качеством пучка (~5-10 мрад), относительно малым уровнем спонтанного шума, узкой шириной линии (<1 нм) и отсутствием релаксационных колебаний [1]. Благодаря этому данный тип лазеров имеет решающее значение для широкого спектра применений в ряде научных и промышленных областей.

В настоящее время авторы занимаются исследованием полупроводниковых дисковых лазеров, излучающих в сине-зеленой области спектра на основной частоте. В качестве активной области полупроводниковых дисковых лазеров была выбрана гетероструктура 2-го типа CdS/ZnSe. Гетероструктуры выращивались методом газофазной эпитаксии из ме-

таллорганических соединений (MOCVD – metalorganic chemical vapour deposition).

Целью данной работы является моделирование (расчет) гетероструктуры 2-го типа CdS/ZnSe с целью сравнения расчетных значений оптических переходов с линиями излучения (люминесценции) выращенных гетероструктур. В статье приводятся результаты расчета гетероструктуры $ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ (~90 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe (3 нм)/ $ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ (~90 нм) при различных уровнях возбуждения и при низкой температуре ($T \approx 10$ К). Расчетные спектры линий усиления сравниваются с линиями люминесценции выращенной гетероструктуры, состоящей последовательно из буферного слоя $ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ (~300 нм), трехслойной квантовой ямы ZnSe (3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe (3 нм) и покровного слоя $ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ (~80 нм).

Известно, что концентрация электронов и дырок в квантовых ямах реальных гетеро-

структур неодинакова. Это приводит к искривлению энергетических зон. Данное явление имеет существенную роль в гетероструктурах с разрывами зон второго типа, где из-за пространственного разделения носителей перекрытие волновых функций электрона и дырки мало. Поэтому в таких гетероструктурах,

наряду с уровнями энергий размерного квантования, также важно рассчитать интеграл перекрытия волновых функций электрона и дырки I , который непосредственно фигурирует в формуле для расчета материального коэффициента усиления [2]:

$$g(\hbar\omega) = C_g(\hbar\omega) \cdot \int_{E_{cv}}^{\infty} |M|^2 \cdot \rho_r^{QW} \cdot I^2 \cdot (f_e(E) - f_h(E) - 1) \cdot L(\hbar\omega, E) \cdot dE;$$

$$C_g(\hbar\omega) = \frac{\pi \cdot q_e^2 \cdot \hbar}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_0 \cdot m_0^2 \cdot n_r \cdot \hbar\omega} \quad (1)$$

где I – интеграл перекрытия волновых функций электрона и дырки, $|M|^2$ – матричный элемент, ρ_r^{QW} – приведенная плотность состояний, $f_e(E)$ и $f_h(E)$ – функции распределения Ферми для электронов и дырок; $L(\hbar\omega, E)$ – форма линии.

Исходная зонная диаграмма гетероструктуры второго типа $ZnS_{0.1}Se_{0.9}/ZnSe/CdS/ZnSe/ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ в невозбужденном состоянии схематически представлена на рисунке 1. Для простоты расчетов пренебрежем разрывом зон (~10 мэВ) между $ZnSe$ и $ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ в зоне проводимости.

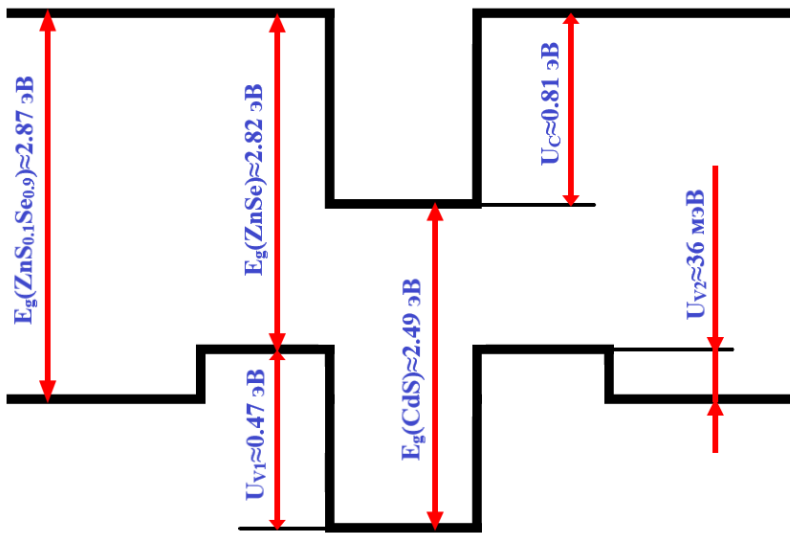


Рисунок 1 – Зонная диаграмма гетероструктуры 2-го типа $ZnS_{0.1}Se_{0.9}/ZnSe/CdS/ZnSe/ZnS_{0.1}Se_{0.9}$ в невозбужденном состоянии ($T \approx 10$ K)

Для нахождения энергетических уровней электрона и дырки при низком уровне возбуждения решались уравнения Шредингера (2–3). При высоких уровнях же возбуждения гетероструктуры, необходимо решить систему урав-

нений Шредингера и Пуассона (2–4). Кроме того, также определены интегралы перекрытия электрона и дырки при рассматриваемых уровнях накачки.

$$\frac{\hbar^2}{2} \cdot \left[\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m_e^*} \cdot \frac{d\psi_e(z)}{dz} \right) \right] + [E_{e1} - U_e(z)] \cdot \psi_e(z) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\hbar^2}{2} \cdot \left[\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m_h^*} \cdot \frac{d\psi_h(z)}{dz} \right) \right] + [E_{h1} - U_h(z)] \cdot \psi_h(z) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dz} \cdot \left[\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{dV(z)}{dz} \right] + q_e \cdot \sigma \cdot \left[\frac{\psi_e(z)}{\int_{-\infty}^{\infty} \psi_e(z) \cdot d(z)} - \frac{\psi_h(z)}{\int_{-\infty}^{\infty} \psi_h(z) \cdot d(z)} \right] = 0 \quad (4)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость структуры, $U_e(z) = U_{0e}(z) + V(z)$, $U_h(z) = U_{0h}(z) + V(z)$, $U_{0e}(z)$ и $U_{0h}(z)$ – потенциальная энергия, соответственно для электрона и дырки согласно зонной диаграмме невозбужденной гетероструктуры.

При расчете гетероструктуры предполагалось, что гетерограницы между слоями в квантовой яме плавные, и потенциалы для электрона и дырки, которые отсчитываются, соответственно, от дна зоны проводимости и потолка валентной зоны барьерного слоя

$$U_{0e}(z) = -0.81 \cdot e^{-(z)^{20}} \quad (5)$$

$$U_{0h}(x) = -2.87 - 0.43 \cdot e^{-(z)^{20}} + 0.036 \cdot e^{-\left(\frac{z-2.5}{1.5}\right)^{20}} + 0.036 \cdot e^{-\left(\frac{z+2.5}{1.5}\right)^{20}} \quad (6)$$

Расчеты проводились при низкой температуре ($T \approx 10$ K) для следующих уровней возбуждения гетероструктуры: 1 – $0.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 2 – $0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 3 – $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 4 – $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 5 – $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 6 – $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 7 – $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 8 – $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 9 – $10 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В случае низкой температуры можно предположить, что все электроны и дырки находятся в нижних подзонах. При слабой накачке зонная диаграмма гетероструктуры не подвержена искривлению. Самосогласованное решение уравнений (2–4) при высоких уровнях накачки достигалось последовательным решением уравнений до достижения сходимости с помощью математического пакета *MathCAD*.

ZnSSe описываются непрерывной супергауссовой функцией $A(z) = A_0 \cdot e^{-\left(\frac{z}{z_0}\right)^N}$.

Для определенности выбрана степень супергауссовой функции $N = 20$. Тогда с учетом разрывов и ширин запрещенных зон соответствующих слоев исходные потенциалы для электрона и дырки при малом уровне накачки для гетероструктуры ZnS_{0.1}Se_{0.9}(~90 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe(3 нм)/ZnS_{0.1}Se_{0.9}(~90 нм) можно представить следующими выражениями:

На рисунке 2 представлены расчётные спектры оптического усиления гетероструктуры ZnS_{0.1}Se_{0.9}(~90 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe(3 нм)/ZnS_{0.1}Se_{0.9}(~90 нм) при температуре 15 K и различных концентрациях неравновесных носителей.

Расчетная длина волны излучения данной гетероструктуры при концентрации неравновесных носителей $\sigma_{e-h} \approx 0.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ равна ≈ 544 нм ($E_1 \approx 0.59$ эВ, $H_1 \approx 17$ мэВ; отчет уровней размерного кантования идет от неискривленного барьера). Интеграл перекрытия волновых функций электрона и дырки для данного уровня возбуждения гетероструктуры равен $I \approx 0,28$ ($I^2 \approx 0,08$).

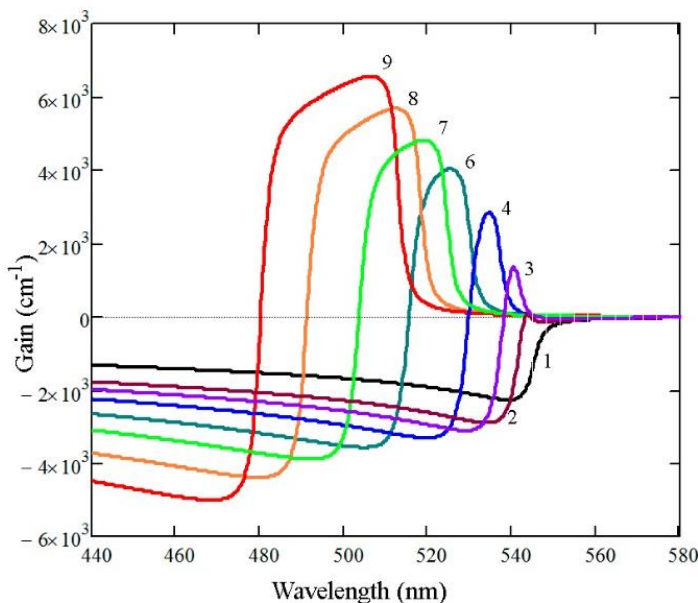


Рисунок 2 – Расчётные спектры оптического усиления гетероструктуры ZnS_{0.1}Se_{0.9}(~90 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe(3 нм)/ZnS_{0.1}Se_{0.9}(~90 нм) при температуре 15 K и различных концентрациях неравновесных носителей:
1 – $0.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 2 – $0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 3 – $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 4 – $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 5 – $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 6 – $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 7 – $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 8 – $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 9 – $10 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

При высоком же уровне возбуждения ($\sigma_{e-h} \approx 10 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) расчетное значение длины волны излучения равно $\approx 512 \text{ нм}$ ($E_1 \approx 0.41 \text{ эВ}$, $H_1 \approx 55 \text{ мэВ}$; отчет уровней размерного кантования идет от не искривленного барьера). Интеграл перекрытия волновых функций электрона и дырки для данного уровня возбуждения гетероструктуры равен $I \approx 0,44$ ($I^2 \approx 0,22$).

Как видно, увеличение уровня накачки приводит к характерному для гетероструктуры 2-го типа сдвигу линии излучения в коротковолновую сторону, что связано с искривлением зонной диаграммы вблизи квантовой ямы.

Данный сдвиг наблюдался на всех выращенных гетероструктурах. Также следует отметить, что повышение уровня накачки приводит к увеличению интеграла перекрытия волновых функций электрона и дырки.

На рисунке 3 представлены спектры люминесценции выращенной гетероструктуры с аналогичными толщинами слоев квантовой ямы при низкой температуре ($T \approx 10 \text{ K}$) и при различных уровнях возбуждения. Линии излучения квантовой ямы гетероструктуры на полувысоте при высокой и низкой накачке, соответственно, равны около 483 и 526 нм.

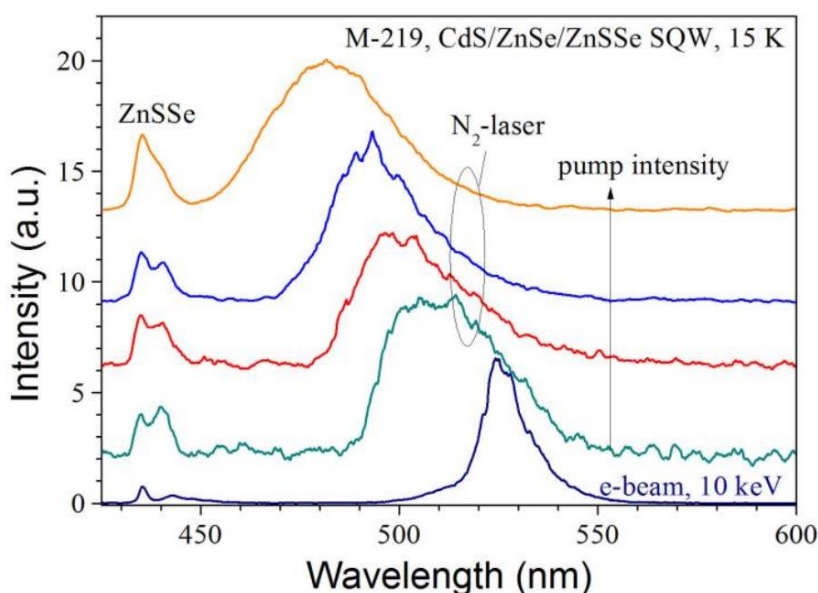


Рисунок 3 – Спектры люминесценции выращенной гетероструктуры $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ (~300 нм)/ZnSe(3 нм)/CdS(2 нм)/ZnSe(3 нм)/ $\text{ZnS}_{0.1}\text{Se}_{0.9}$ (~80 нм) при низкой температуре ($T \approx 10 \text{ K}$) и при различных уровнях возбуждения

Коротковолновый сдвиг соответствует расчету, хотя абсолютные значения длин волн несколько отличаются. Одной из причин несовпадения спектров люминесценций выращенной гетероструктуры с расчетными значениями оптического перехода может быть раз-

мывание гетерограниц слоев квантовой ямы за счет взаимной диффузии кадмия и цинка [3, 4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90022.

Библиографический список

1. O.G. Okhotnikov, Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology. (Weinheim: Wiley-VCH, 2010).
2. W. Braun, P. Dowd, C.-Z. Guo, S.-L. Chen, C. M. Ryu, U. Koelle, S. R. Johnson, Y.-H. Zhang, J. W. Tomm, T. Elsässer, D. J. Smith. Strained InGaAs/GaPAsb heterostructures grown on GaAs (001) for optoelectronic applications in the 1100–1550 nm range. J. Appl. Phys. 88, #5, 3004-3014 (2000).
3. Cd diffusion in CdS/ZnSe MQW heterostructures grown by MOVPE for semiconductor disk lasers; Butaev M.R., Kozlovsky V.I., Martovitsky V.P., Skasyrsky Y.K., Sviridov D.E.; Journal of Alloys and Compounds. 2021. Т. 880. С. 160555.
4. Бутаев М.Р., Козловский В.И., Скасырский Я.К. Полупроводниковый лазер с оптической накачкой на основе наноразмерной гетероструктуры CaS/ZnSe с разрывами зон второго типа // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 7. С. 683-687.

Referenses

1. O.G. Okhotnikov, Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology. (Weinheim: Wiley-VCH, 2010).

2. W. Braun, P. Dowd, C.-Z. Guo, S.-L. Chen, C. M. Ryu, U. Koelle, S. R. Johnson, Y.-H. Zhang, J. W. Tomm, T. Elsässer, D. J. Smith. Strained InGaAs/GaPAsSb heterostructures grown on GaAs (001) for optoelectronic applications in the 1100–1550 nm range. *J. Appl. Phys.* 88, #5, 3004-3014 (2000).

3. Cd diffusion in CdS/ZnSe MQW heterostructures grown by MOVPE for semiconductor disk lasers; Butaev M.R., Kozlovsky V.I., Martovitsky V.P., Skasyrsky Y.K., Sviridov D.E.; *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Т. 880. S. 160555.

4. Butaev M.R., Kozlovskij V.I., Skasyrskij YA.K. Poluprovodnikovyy lazer s opticheskoy nakachkoj na osnove nanorazmernoj geterostruktury CaS/ZnSe s razryvami zon vtorogo tipa // *Kvantovaya elektronika*. 2020. Т. 50. № 7. S. 683-687.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 28.12.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 23.02.2023

Принята к публикации / Accepted 27.02.2023

© Н.Р. Юнусова, В.И. Козловский, М.Р. Бутаев, Я.К. Скасырский, 2023

Сведения об авторах

List of Authors

Юнусова Наида Рабадановна – аспирант Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Naida Yunusova – Post-graduate Student of the National Research Nuclear University MEPHI.

Козловский Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Vladimir Kozlovsky – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

Бутаев Марат Раджабалиоглы – аспирант Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Marat Butaev – Post-graduate Student of the National Research Nuclear University MEPHI.

Скасырский Ян Константинович – кандидат физико-математических наук, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Yan Skasyrsky – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

Ссылка для цитирования: *Юнусова Н.Р., Козловский В.И., Бутаев М.Р., Скасырский Я.К.* Сравнение расчетных значений оптических переходов со спектром люминесценции выращенных гетероструктур второго типа CdS/ZnSe // *Научные исследования: итоги и перспективы*. 2023. Т. 4, № 1. С. 29 - 33. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-29-33.

For citation: *Yunusova N.R., Kozlovsky V.I., Butaev M.R., Skasyrsky Ya.K.* Comparison of the calculated values of optical transitions with the luminescence spectrum of grown heterostructures of the second type CdS/ZnSe // *Scientific researches: results and prospects*. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 29 - 33. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-29-33.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ДЕФОРМАЦИИ

Л.А. Рябичева¹, А.В. Дядичев²

¹ Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск 91034, Россия, Луганская Народная Республика, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а

² Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, проспект Академика Вернадского, 4
ryabic@gmail.com, mr.dyadichev@mail.ru

Аннотация. Исследовано изменение ресурса пластичности при прямом выдавливании пористых порошковых заготовок с облегчающими полостями при различных величинах противодействия. Установлено, что наличие облегчающей полости способствует повышению ресурса пластичности за счет уменьшения жесткости напряженно-деформированного состояния. Представлена усовершенствованная методика определения предельных деформаций и ресурса пластичности.

Ключевые слова: облегчающая полость, пористая порошковая заготовка, предельная деформация, прямое выдавливание, ресурс пластичности.

Abstract. The change in the plasticity resource during direct extrusion of porous powder blanks with lightening cavities at various values of counterpressure has been studied. It has been established that the presence of a facilitating cavity contributes to an increase in the plasticity resource due to a decrease in the rigidity of the stress-strain state. An improved method for determining ultimate strains and plasticity resource is presented.

Key words: lightening cavity, porous powder billet, limiting deformation, direct extrusion, plasticity resource.

Введение

При изготовлении деталей машиностроения из компактных материалов находят применение разнообразные методы выдавливания, которые позволяют повысить коэффициент использования металла и получить детали высокого качества [1]. Для изготовления деталей из порошковых материалов выдавливание используется меньше, что связано с наличием стадии уплотнения материала и снижение при этом стойкости инструмента. Однако выдавливание деталей сложной формы из порошковых материалов представляет особый интерес вследствие получения деталей сложной формы с большими перепадами сечений и внутренними полостями и необходимым комплек-

сом механических свойств [2, 3, 4]. В то же время применение операций выдавливания для изготовления изделий из порошковых пористых заготовок сдерживается сложностью исследования ресурса пластичности порошковых материалов, который зависит не только от температурно-скоростных условий деформирования, но и от физического состояния пористого тела, а также формы образующей поверхности [5, 6].

В связи с этим существует необходимость дальнейшего развития новых подходов к оценке деформируемости металлов и сплавов при решении прикладных задач с использованием метода конечных элементов.

Целью работы является повышение качества порошковых полых деталей типа «стакан», получаемых по схеме прямого выдавливания, на основе оценки величины использованного ресурса пластичности.

Результаты исследований

Рассматривали прямое выдавливание с противодавлением 95, 120 и 150 МПа полых детали «стакан» из медной порошковой заготовки исходной пористостью 15%. Ресурс пластичности определяли на основе параметров напряженно-деформированного состояния в угловом сечении заготовки. Для выдавливания использовали заготовки трех типов: без облегчающей полости; с облегчающей полостью у верхнего торца; с облегчающей полостью у нижнего торца. После прессования осуществляли спекание заготовок в шахтной лабораторной печи СШОЛ-11.6/12-МЗ в среде синтез-газа по ступенчатому режиму [7].

На основе инвариантов тензора напряжений предложены критерии ресурса пластичности для компактных материалов, учитывающие жесткость напряженного состояния в виде безразмерных показателей η и η_2 , и вид напряженного состояния, определяемый параметром Надаи-Лоде и характеризующий влияние среднего по величине главного напряжения на пластичность материала [5, 6, 8]:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad \mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (1)$$

Количественной мерой пластичности деформируемого материала является величина предельной деформации, определяемая по диаграмме пластичности, которую строят по результатам механических испытаний на растяжение, сжатие и кручение при заданных условиях деформирования. Для исследования объемного напряженного состояния С.И. Губкин и В.А. Огородников предложили строить диаграмму пластичности в виде поверхности предельных деформаций в пространстве безразмерных показателей η и μ_σ : $e_p(\eta, \mu_\sigma)$.

Для порошковых пористых материалов исследование ресурса пластичности возможно на основе параметров деформированного со-

стояния, определяемых экспериментально. В этом случае, подобно (1), определяется жесткость деформированного состояния и вид деформированного состояния в виде параметра Надаи-Лоде по деформациям [5, 7]:

$$\eta = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_i}, \quad \mu_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}. \quad (2)$$

В результате общий вид критерия ресурса пластичности представляется выражением:

$$\Psi = \int_0^{e_i} n \frac{e_i^{n-1}}{e_\delta(\eta, \mu_\sigma)^n} de_i \leq 1, \quad (3)$$

где e_δ – предельная деформация до разрушения; e_i – интенсивность деформаций; $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ – поверхность предельных деформаций; $n = 1 + 0,2 \arctg(d\eta/de_i)$ – показатель, учитывающий характер изменения пластичности в зависимости от жесткости напряженного состояния.

Вид траекторий нагружения и предельные деформации определяются схемой деформирования и почти не зависят от свойств материала, что позволяет использовать выражение (3) для исследования ресурса пластичности как компактных, так и порошковых материалов. Для аппроксимации поверхности предельных деформаций используется зависимость [5]:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = \frac{e_p(0,0) \exp(-b\eta)}{1 + \lambda_1 \mu_\sigma + \lambda_2 \mu_\sigma^2}, \quad (4)$$

где λ_1, λ_2, b – коэффициенты аппроксимации; $e_p(0,0)$, $e_p(-1,0)$, $e_p(1,0)$ – предельная деформация при кручении, сжатии и растяжении; $\dot{\varepsilon}_{test}$ – скорость деформации при механических испытаниях; $\dot{\varepsilon}_{def}$ – средняя скорость деформации в процессе обработки давлением.

В результате механических испытаний, выполненных на испытательных машинах ZD-10/90 и NJS-02, установлено, что $e_p(0,0) = 0,91$; $e_p(-1,0) = 0,96$; $e_p(0,1) = 0,57$. Производную коэффициента Лоде от интенсивности деформаций можно получить численным дифференцированием (1) по e_i в любой точке заготовки. Тогда критерий ресурса пластичности будет иметь вид:

$$\Psi = \int_0^{e_i} n \frac{e_i^{n-1}}{\left(e_p(\eta, \mu_\varepsilon) = \frac{e_p(0,0) \exp(-b\eta)}{1 + \lambda_1 \mu_\varepsilon + \lambda_2 \mu_\varepsilon^2} \right)^n} de_i \leq 1 \quad (5)$$

где $n = 1 + b \cdot \arctg(\dot{\eta}_{2\varepsilon})$.

Результаты интегрирования выражения (5) представлены на рисунке 1 (кривая 1).

При прямом выдавливании заготовки ресурс пластичности после преобразований будет иметь вид:

$$\Psi = 0,18e_i + \frac{0,18e_i^2}{2} + \frac{0,18e_i^3}{6} + \frac{0,18e_i^4}{24} + \frac{0,18e_i^5}{120} + \frac{0,18e_i^6}{720} + \frac{0,18e_i^7}{5040}. \quad (6)$$

Результаты определения ресурса пластичности по (6) численным интегрированием представлены на рисунке 1 (кривая 2).

Анализ использования ресурса пластичности показал, что наиболее оптимальным является выдавливание заготовок с облегчающей полостью у нижнего торца и противодавлением 120 МПа, поскольку при этом степень использования ресурса пластичности наименьшая, что обеспечивает получение бездефектных деталей. Дальнейшее увеличение противодавления до 150 МПа приводит к увеличению ресурса пластичности на 7-8% и нецелесообразно из-за увеличения силы деформирования и напряжений в инструменте без существенного повышения качества изделий. Указанные результаты подтверждены поверхностями предельных деформаций, которые построены с использованием зависимостей (4), (5), (6) и приведены на рисунках 2 и 3.

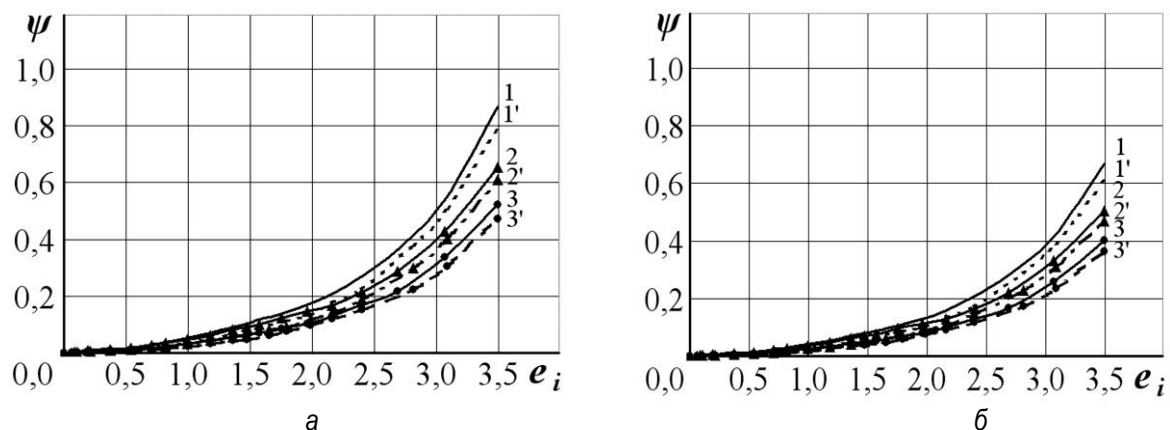


Рисунок 1 – Определение ресурса пластичности точек в угловом сечении заготовок: а – выдавливание с противодавлением 95 МПа; б – выдавливание с противодавлением 120 МПа; 1, 2, 3 – численным интегрированием выражения (7); 1', 2', 3' – согласно формуле (9); 1, 1' – заготовка без облегчающей полости; 2, 2' – заготовка с верхней облегчающей полостью; 3, 3' – заготовка с нижней облегчающей полостью

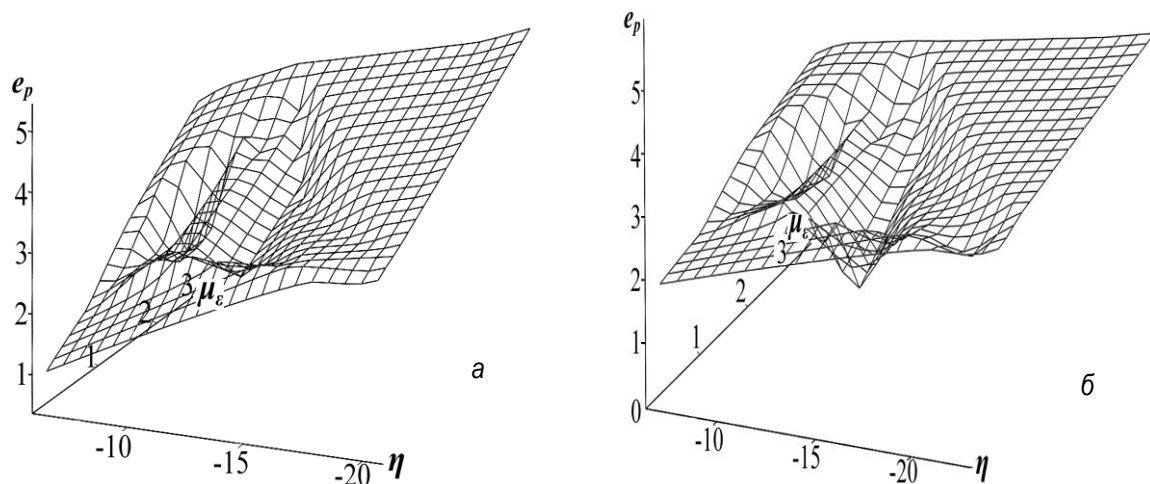


Рисунок 2 – Поверхности предельных деформаций при выдавливании заготовок с нижней облегчающей полостью: а – противодавление 95 МПа; б – противодавление 120 МПа

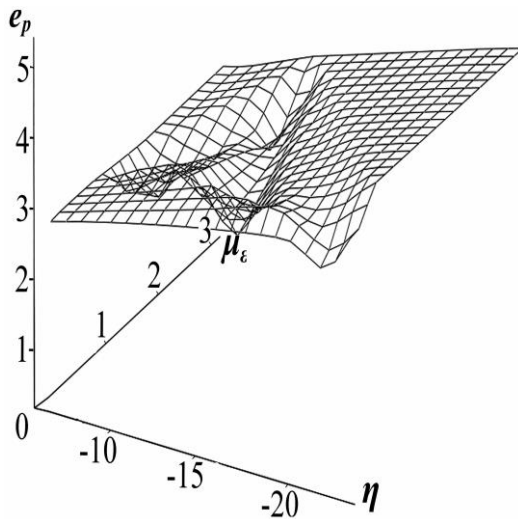


Рисунок 3 – Поверхности предельных деформаций при выдавливании заготовок с нижней облегчающей полостью при противодавлении 150 МПа

Заключение

Таким образом, получила развитие методика построения поверхностей предельных деформаций для порошковых материалов при различных скоростях деформирования на основе результатов механических испытаний. Предложены зависимости для определения ресурса пластичности при обработке давлением порошковых материалов. Установлено, что

наличие облегчающей полости способствует повышению ресурса пластичности за счет уменьшения жесткости напряженно-деформированного состояния. По результатам оценки ресурса пластичности определена оптимальная величина противодавления 120 МПа и форма заготовки с облегчающей полостью у нижнего торца, обеспечивающая получение изделий высокого качества.

Библиографический список

1. Головин В.А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В.А. Головин, А.Н. Митькин, А.Г. Резников. М.: Машиностроение, 1970. 152 с.
2. Волкогон Г.М. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование / Г.М. Волкогон, А.М. Дмитриев, Е.П. Добряков [и др.]. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.
3. Роман О.В. Исследование процесса холодной штамповки выдавливанием спеченных пористых материалов / О.В. Роман, Е.А. Дорошкевич, Е.В. Звонарев [и др.] // Порошковая металлургия. 1980. № 11. С. 28-34.
4. Рябичева Л.А. Применение выдавливания для изготовления деталей из порошковых материалов // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: сб. научных трудов. Луганск: Изд. ЛНУ им. В. Даля. 2017. № 2 (19). С. 54-60.
5. Огородников В.А., Киселев В.Б., Сивак И.О. Энергия. Деформации. Разрушение. Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 204 с.
6. Алимов В.И. Наследственность в сплавах и ресурсосберегающие технологии их упрочнения // Сб. «Прогрессивные технологии машиностроения и современность». Донецк, ДонГТУ. 1997. С. 8-9.
7. Ryabicheva L., Usatyuk D., Nikitin Y. The technology of production of high-density copper from porous fibrous billet // VI International Congress «Machines, Technologies, Materials» MTM'09 Proceedings, Sofia, Bulgaria, 2009. P. 126–130.
8. Огородников В.А., Музичук В.І., Нахайчук О.В. Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. 179 с.

Referenses

1. Golovin V.A. Tekhnologiya holodnoj shtampovki vydavlivaniem / V.A. Golovin, A.N. Mit'kin, A.G. Reznikov. M.: Mashinostroenie, 1970. 152 s.
2. Volkogon G.M. Progressivnyye tekhnologicheskie processy shtampovki detalej iz poroshkov i oborudovanie / G.M. Volkogon, A.M. Dmitriev, E.P. Dobryakov [i dr.]. M.: Mashinostroenie, 1991. 320 s.

3. Roman O.V. Issledovanie processa holodnoj shtampovki vydavlivaniem spechennyh poristyh materialov / O.V. Roman, E.A. Doroshkevich, E.V. Zvonarev [i dr.] // Poroshkovaya metallurgiya. 1980. № 11. S. 28-34.
4. Ryabicheva L.A. Primenenie vydavlivaniya dlya izgotovleniya detalej iz poroshkovyh materialov // Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii: sb. nauchnyh trudov. Lugansk: Izd. LNU im. V. Dalya. 2017. № 2 (19). S. 54-60.
5. Ogorodnikov V. A., Kiselev V.B., Sivak I.O. Energiya. Deformacii. Razrushenie. Vinnica: UNIVERSUM-Vinnicya, 2005. 204 s.
6. Alimov V.I. Nasledstvennost' v splavah i resursosberegayushchie tekhnologii ih uprochneniya // Sb. «Progressivnye tekhnologii mashinostroeniya i sovremenност'». Doneck, DonGTU. 1997. s. 8-9.
7. Ryabicheva L., Usatyuk D., Nikitin Y. The technology of production of high-density copper from porous fibrous billet // VI International Congress «Machines, Technologies, Materials» MTM'09 Proceedings, Sofia, Bulgaria, 2009. P. 126–130.
8. Ogorodnikov V.A., Muzichuk V.I., Nahajchuk O.V. Mekhanika procesiv holodnogo formozminyuvannya z od-notipnimi skhemami mekhanizmu deformacii. Vinnicya: UNIVERSUM-Vinnicya, 2007. 179 s.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 18.12.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 12.02.2023

Принята к публикации / Accepted 15.02.2023

© Л.А. Рябичева, А.В. Дядичев, 2023

Сведения об авторах
List of Authors

Рябичева Людмила Александровна – доктор технических наук, профессор Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

Lyudmila Ryabicheva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Luhansk Vladimir Dahl State University.

Дядичев Александр Валерьевич – аналитик департамента научно-исследовательской деятельности Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского.

Alexander Dyadichev – Analyst of the Department of Research Activities of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

Ссылка для цитирования: *Рябичева Л.А., Дядичев А.В.* Исследование ресурса пластичности для порошковых пористых материалов при их деформации // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 1. С. 34 - 38. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-34-38.

For citation: *Ryabicheva L.A., Dyadichev A.V.* Study of plasticity resource for porous powder materials during their deformation // Scientific researches: results and prospects. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 34 - 38. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-34-38.

ПОВЫШЕНИЕ УДАРНО-АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ КЛАПАНА БУРОВОГО НАСОСА

Б.Г. Гасанов, П.В. Сиротин, М.А. Исмаилов, Е.В. Харченко
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, Новочеркасск
346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132
Kafmlsik@gmail.com

Аннотация. Ресурс работы буровых насосов во многом зависит от изнашивания уплотнительного элемента и опорных металлических поверхностей седла и тарелки клапана. Они подвергаются износу из-за использования абразив содержащих жидкостей и утяжеленных буровых растворов. Экспериментально выявлено, что характер взаимодействия абразивных частиц с контактирующими поверхностями указывает на признаки ударно-абразивного изнашивания. Предложено решение по совместному использованию упруго-диссипативной подложки из резиновой смеси и износостойкого порошкового материала, разработанное для деталей клапана. Это позволило повысить его износостойкость в несколько раз, снизить расходы на изготовление составного седла клапана из порошковых материалов взамен производству из компактных сталей.

Ключевые слова: износостойкость, клапан бурового насоса, порошковый материал, ударно-абразивный износ, упруго-диссипативная подложка.

Abstract. The service life of mud pumps largely depends on the wear of the sealing element and the supporting metal surfaces of the seat and valve disc. They are subject to wear due to the use of abrasive fluids and heavy drilling fluids. It has been experimentally revealed that the nature of the interaction of abrasive particles with contact surfaces indicates signs of impact-abrasive wear. A solution was proposed for the joint use of an elastic-dissipative substrate made of a rubber compound and a wear-resistant powder material developed for valve parts. This made it possible to increase its wear resistance by several times, to reduce the cost of manufacturing a composite valve seat from powder materials instead of production from compact steels.

Key words: wear resistance, mud pump valve, powder material, shock-abrasive wear, elastic-dissipative substrate.

Введение

Одним из основных требований, которое предъявляется к буровым насосам, применяемым в процессе бурения нефтегазовых скважин, геологоразведке и других работах, является высокая эксплуатационная надежность их узлов и агрегатов. Анализ литературы и эксплуатация буровых насосов показывает, что в настоящее время ресурс деталей гидравлического блока буровых насосов недостаточно высокий [1, 2, 3, 4]. В частности, наиболее часто в процессе эксплуатации требуют замены клапана буровых насосов. Например, при бурении скважин с промывкой водой ресурс клапанов составляет 160-180 ч., а при использовании абразивсодержащих и агрессивных

жидкостей, буровых растворов с повышенной плотностью, а также в экстремальных условиях эксплуатации их ресурс уменьшается до 10-15 часов [5].

Анализ и исследование типа износа клапанов буровых насосов

Установлено, что в процессе работы бурового насоса уплотнительный резиновый элемент клапана подвержен механическому износу, в особенности в местах наибольшей концентрации напряжений. При этом совместно с механическим изнашиванием происходит усталостное разрушение уплотнительного элемента, которое ускоряется из-за износа сопряженных поверхностей тарелки и седла

клапана. Износ опорных металлических поверхностей седла и тарели клапана связан с одновременным воздействием динамических нагрузок и абразивных частиц, содержащихся в буровом растворе (рисунок 1).

Абразивные частицы, взаимодействуя с поверхностью тарели и седла при их контакти-

ровании, оставляют лунки и вмятины различной формы, внедряются в тело детали, тем самым, проявляются признаки ударно-абразивного и впоследствии гидроабразивного изнашивания (рисунок 2).

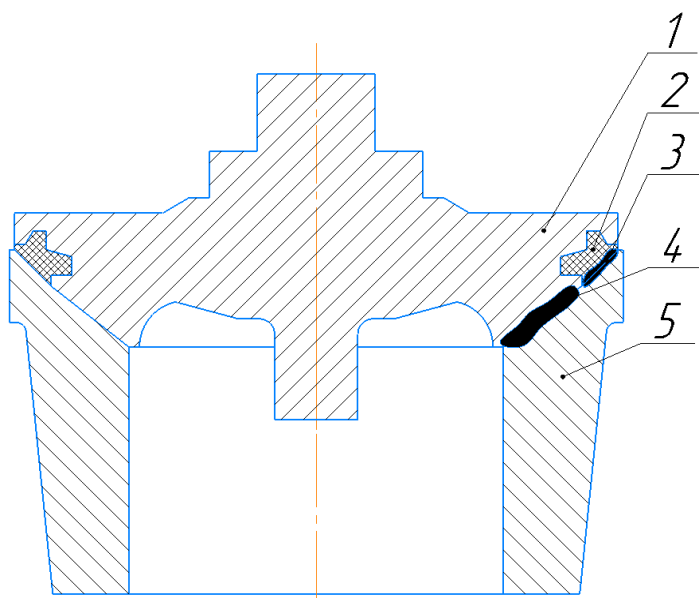


Рисунок 1 – Клапан бурового насоса: 1 – тарель; 2 – уплотнительный элемент тарели; 3 – зона контакта «резина-металл»; 4 – зона контакта «металл-металл»; 5 – седло клапана

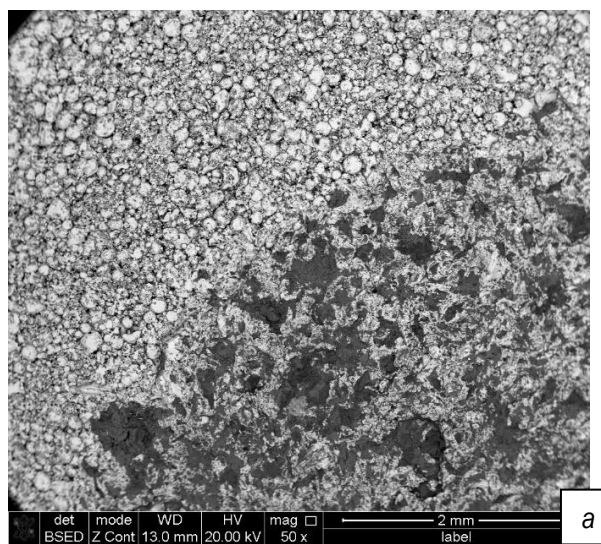
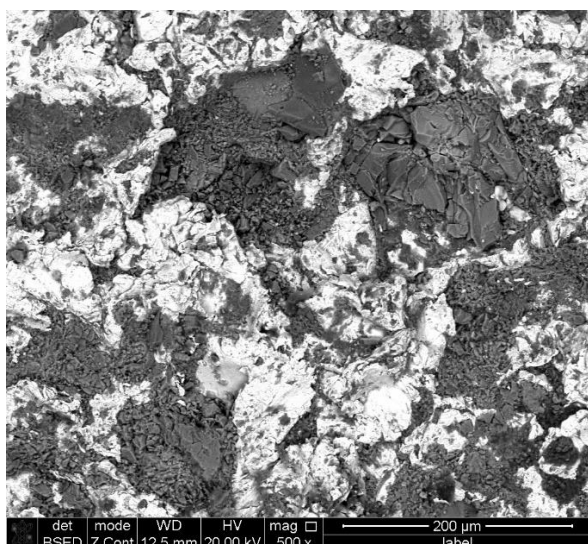


Рисунок 2 – Поверхность образца из стали П40Х после испытания на ударно-абразивный износ: а – граница удара контртела по порошковому образцу; б – абразивные частицы, внедренные в поверхность образца

Отличительным признаком ударно-абразивного изнашивания является наличие в зоне контакта тарели и седла клапана абразивных частиц, при котором происходит деформация микрообъемов или их скалывания,

что приводит к интенсивному разрушению поверхностного слоя контактирующих поверхностей. Известно, что интенсивность ударно-абразивного изнашивания также связана с энергетическими и кинематическими парамет-

рами ударного воздействия [6, 7, 8]. Проведенные испытания на ударно-абразивный износ образцов из порошковых сталей указывают на взаимосвязь энергии удара с действующими процессами формирования лунок при динамическом внедрении абразивных частиц в поверхность контактирующих деталей [8].

Анализ публикаций и экспериментальные данные показали, что порошковые материалы, разрабатываемые для деталей клапана бурового насоса, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, должны обладать не только высокой твердостью, вязкостью, износостойкостью, но и необходимыми демпфирующими характеристиками. Однако достичь в одном материале традиционными методами легирования и упрочнения одновременно высоких прочностных и демпфирующих характеристик невозможно. В связи с этим одним из эффективных способов повышения ударно-абразивной износостойкости является применение многослойных порошковых материалов «износостойкая порошковая сталь – упруго-диссипативная подложка».

Повышение износостойкости бурового клапана за счет применения порошковой стали и упруго-диссипативной подложки

В предыдущих исследованиях экспериментально обосновано, что совместное использование упруго-диссипативной подложки из резиновой смеси и износостойкого порошкового материала, разработанного для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, позволяет повысить их износостойкость в несколько раз [9]. В этой работе приводятся результаты исследования влияния композиционного материала «износостойкая сталь – упругодемпирующая подложка» на ударно-абразивное изнашивание. Введение в шихту графита оказывает существенное влияние на ударно-абразивное изнашивание за счет изменения механизма износа, при этом концентрация графита на поверхности порошковой стали 1,0–1,5 мас. % дает наименьший износ при оптимальном сочетании твердости и вязкости как основных параметров, обеспечивающих устойчивость к ударно-абразивному износу. Было выяснено, что способ введения легирующего элемента

также влияет на износ порошкового материала. Так, при введении хрома в состав сплава ПР-65Х25Г13НЗ величина износа будет определяться количеством частиц порошка на поверхности удара, содержание которых пропорционально концентрации хрома. При введении хрома в состав порошка ПВ-Х18Н15-56 повышение износа объясняется разупрочнением матрицы в результате диффузии углерода в зоны с высокой концентрацией хрома. Введение никеля также обеспечивает повышение ударно-абразивного износа из-за упрочнения матрицы и повышения вязкости порошкового материала.

В результате исследований установлено, что жесткость с образцов зависит от площади поперечного сечения S_0 упругого элемента (рисунок 3). Выявлена зависимость износа от жесткости s и объема V упруго-диссипативной подложки, которая напрямую зависит от уровня демпфирования. Из рисунка 4 видно, что использование упруго-диссипативной подложки позволяет снизить износ образцов. Это можно объяснить тем, что при ударе образца с демпфирующим слоем происходит поглощение части энергии удара. Вследствие чего сдвиговые процессы на поверхности удара, которые приводят к образованию частиц износа, постепенно затухают и абразивное действие твердой частицы ограничено высотой образующей лунки, а сдвиговые процессы металла перемычек сведены к минимуму. Как видно из рисунка 5, на ударно-абразивное изнашивание влияет изменение площади поперечного сечения S_0 упругой подложки. Площадь поперечного сечения изменяли не только высотой h упругого элемента, но и вырубкой в нем отверстий разной конфигурации. Так, наименьший износ 0,0079 г имели образцы с площадью поперечного сечения $S_0 = 100$ мм².

Для производства тарелок и седел клапанов буровых насосов применяются различные марки сталей, например, 40Х, 40ХНМ и др. с закалкой токами высокой частоты, низкоуглеродистые легированные конструкционные стали 18ХГТ, 20Г и др. с цементацией [10]. Также детали клапана бурового насоса могут быть изготовлены из порошковых сталей [11].

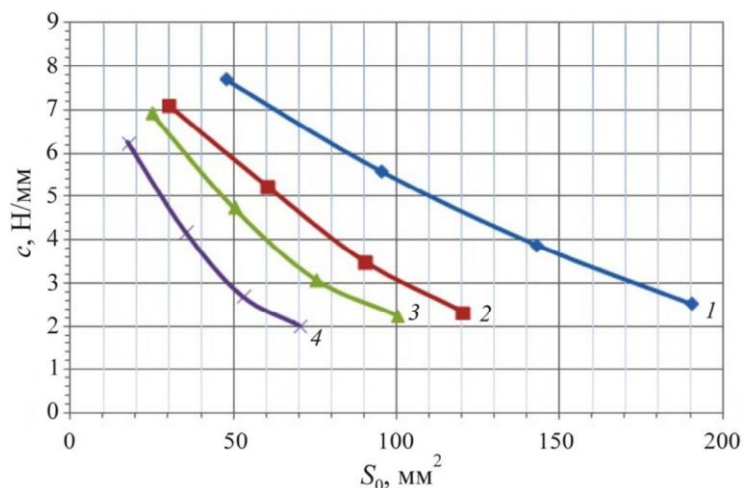


Рисунок 3 – Зависимость жесткости от площади поперечного сечения упругой подложки: 1 – без отверстия; 2 – диаметр отверстия 7 мм; 3 – диаметр отверстия 9 мм; 4 – диаметр отверстия 12 мм

Рисунок 4 – Зависимость ударно-абразивного износа от жесткости подложки при $E_{уд} = 9,5$ Дж, $V_{уд} = 2,6$ м/с: 1 – без отверстия; 2 – диаметр отверстия 7 мм; 3 – диаметр отверстия 9 мм; 4 – диаметр отверстия 12 мм; 5 – без упругой подложки

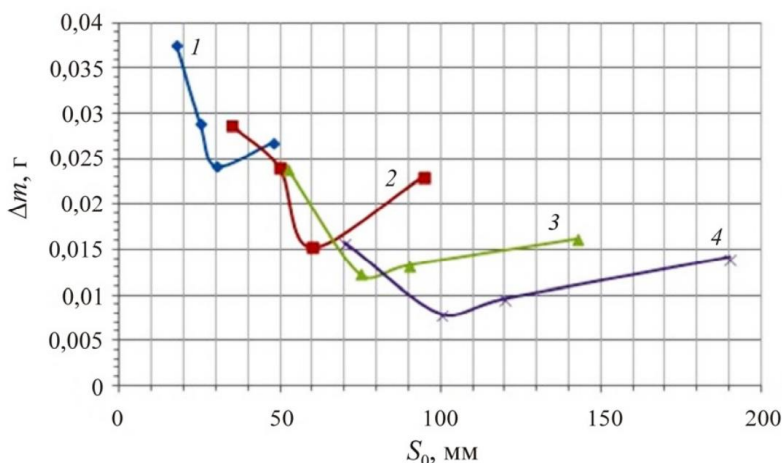
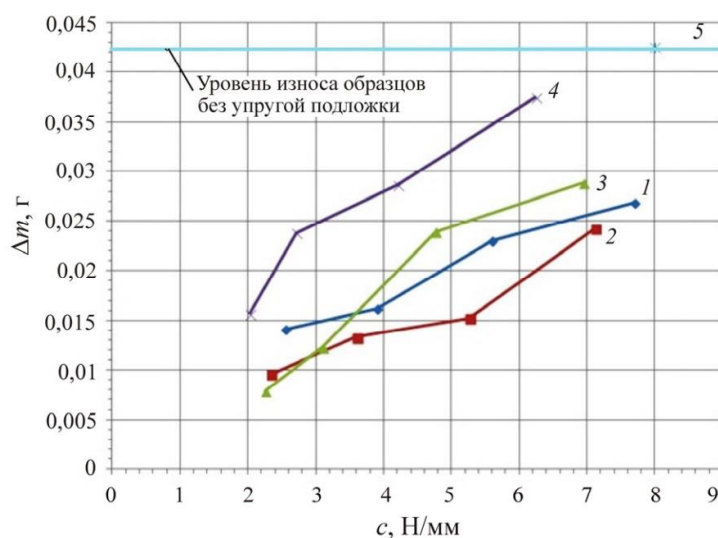


Рисунок 5 – Зависимость ударно-абразивного износа от площади поперечного сечения S_0 упругой подложки: 1 – высота упругой подложки $h = 2,5$ мм; 2 – высота упругой подложки $h = 5$ мм; 3 – высота упругой подложки $h = 7,5$ мм; 4 – высота упругой подложки $h = 10$ мм

Например, седло клапана может быть составным, как показано на рисунке 6. Верхний слой может быть изготовлен из порошковой стали устойчивой к ударно-абразивному износу (поз.1), нижний слой из более дешевого материала (поз. 2), а упруго-диссипативная подложка обеспечит уменьшение износа за счет демпфирования при посадке тарели на седло клапана (поз. 3). Такой вариант исполнения

седла клапана позволяет многократно использовать нижнюю часть при ремонте клапана, а износостойкая часть и упруго-диссипативная подложка заменяются на новые. Тем самым значительно снижаются расходы на производство составного седла клапана из порошковых материалов, по сравнению с седлом клапана из компактных сталей.

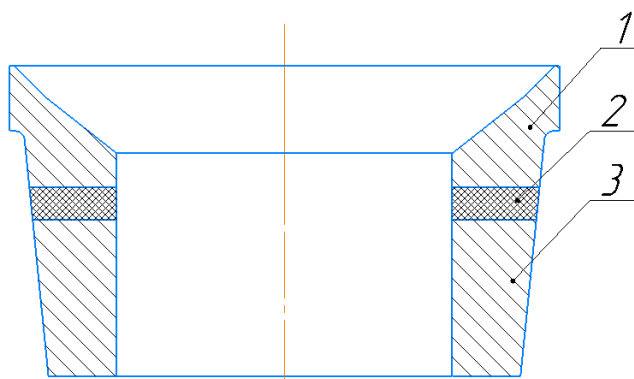


Рисунок 6 – Седло клапана бурового насоса: 1 – износостойкий слой; 2 – упруго-диссипативная подложка; 3 – основной слой

Заключение

Таким образом, обосновано, что совместное использование упруго-диссипативной подложки из резиновой смеси и износостойкого порошкового материала, разработанного для деталей бурового клапана, эксплуатируемого в жестких условиях ударно-абразивного изнашивания, позволяет повысить его износостой-

кость в несколько раз. Предлагаемый вариант решения, когда тарель клапана состоит из двух слоев – верхний слой изготавливается из порошковой износостойкой стали, нижний слой – из дешевого материала, а между ними размещена упруго-диссипативная подложка, позволяет уменьшить износ за счет демпфирования при посадке тарели на седло клапана.

Библиографический список

1. Волков А.С. Буровые геологоразведочные насосы. М.: Недра, 1982. 205 с.
2. Абакумов А.В., Гадалов В.Н., Афанасьев А.А., Тураева О.А. Анализ изнашивания и повреждаемости деталей буровых геологоразведочных насосов // Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика: сб. тр. всерос. совещания. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. С. 7-15.
3. Носиков Н.Е. Влияние условий эксплуатации на долговечность буровых насосов // Разведка и охрана недр. 1973. № 11. С. 51-52.
4. Абдюкова Р.Я. Анализ причин отказов клапанов буровых насосов // Современные технологии в нефтегазовом деле: сб. тр. межд. научно-техн. конф., Октябрьский, 14 марта 2014 г. / Уфимский государственный нефтяной технический университет. Октябрьский: Аркаим, 2014. С. 51-57.
5. Бабаев С.Г. Надежность нефтепромыслового оборудования. М.: Недра, 1997. 264 с.
6. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В. Порошковые материалы для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания // Металлург. 2011. № 3. С. 61-64.
7. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольцев М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
8. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
9. Сиротин П.В., Гасанов Б.Г., Исмаилов М.А. Оценка возможности повышения ударно-абразивной износостойкости композиционных материалов за счет оптимизации их упруго-диссипативных свойств // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20, № 4. С. 43-50.
10. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов. М.: Нефть и газ, 1994. 417 с.
11. Сиротин П.В. Структурообразование, свойства и технологии получения легированных порошковых сталей и деталей из них для буровых и цементировочных насосов: дис. ... канд. техн. наук / П.В. Сиротин. ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, 2011. 177 с.

Referenses

1. Volkov A.S. Burovye geologorazvedochnye nasosy. M.: Nedra, 1982. 205 s.
2. Abakumov A.V., Gadalov V.N., Afanas'ev A.A., Turaeva O.A. Analiz iznashivaniya i povrezhdaemosti detalей burovых geologorazvedochnыh nasosov // Mezhdisciplinarnыe podhody v materialovedenii i tekhnologii. Teoriya i praktika: sb. tr. vseros. soveshchaniya. Belgorod: Izd-vo BGTU, 2015. S. 7-15.
3. Nosikov N.E. Vliyanie uslovij ekspluatacii na dolgovechnost' burovых nasosov // Razvedka i ohrana neдр. 1973. № 11. S. 51-52.

4. Abdyukova R.Ya. Analiz prichin otkazov klapanov burovyyh nasosov // *Sovremennye tekhnologii v nefte-gazovom dele: sb. tr. mezhd. nauchno-tekhn. konf., Oktyabr'skij, 14 marta 2014 g. / Ufimskij gosudar-stvennyj neftyanoy tekhnicheskij universitet. Oktyabr'skij: Arkaim, 2014. S. 51-57.*
5. Babaev S.G. *Nadezhnost' neftepromyslovogo oborudovaniya. M.: Nedra, 1997. 264 s.*
6. Gasanov B.G., Sirotin P.V. Poroshkovye materialy dlya detalej, rabotayushchih v usloviyah udarno-abrazivnogo iznashivaniya // *Metallurg. 2011. № 3. S. 61-64.*
7. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'cev M.G. *Abrazivnoe iznashivanie. M.: Mashinostroenie, 1990. 224 s.*
8. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Albagachiev A.Yu. *Iznashivanie pri udare. M.: Mashinostroenie, 1982. 192 s.*
9. Sirotin P.V., Gasanov B.G., Ismailov M.A. Ocenka vozmozhnosti povysheniya udarno-abrazivnoj iznosostojkosti kompozicionnyh materialov za schet optimizacii ih uprugo-dissipativnyh svojstv // *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie. 2018. T. 20, № 4. S. 43-50.*
10. Vinogradov V.N., Sorokin G.M. *Iznosostojkost' stalej i splavov. M.: Neft' i gaz, 1994. 417 s.*
11. Sirotin P.V. *Strukturoobrazovanie, svojstva i tekhnologii polucheniya legirovannyh poroshkovykh stalej i detalej iz nih dlya burovyyh i cementirovochnyyh nasosov: dis. ... kand. tekhn. nauk / P.V. Sirotin. YURGPU (NPI) im. M.I. Platova, 2011. 177 s.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 24.01.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 17.03.2023

Принята к публикации / Accepted 19.03.2023

© Б.Г. Гасанов, П.В. Сиротин, М.А. Исмаилов, Е.В. Харченко, 2023

Сведения об авторах **List of Authors**

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук, профессор кафедры международных логистических систем и комплексов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Badrudin Gasanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of International Logistics Systems and Complexes, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov.

Сиротин Павел Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей и транспортно-технологических комплексов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Pavel Sirotin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Cars and Transport-Technological Complexes, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov.

Исмаилов Маркиз Азизович – соискатель кафедры автомобилей и транспортно-технологических комплексов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Markiz Ismailov – Applicant, Department of Automobiles and Transport-Technological Complexes, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov.

Харченко Евгений Вячеславович – старший преподаватель кафедры автомобилей и транспортно-технологических комплексов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

Evgeny Kharchenko – Senior Lecturer, Department of Automobiles and Transport-Technological Complexes, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov.

Ссылка для цитирования: *Гасанов Б.Г., Сиротин П.В., Исмаилов М.А., Харченко Е.В. Повышение ударно-абразивной износостойкости деталей клапана бурового насоса // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 1. С. 39 - 44. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-39-44.*

For citation: *Gasanov B.G., Sirotin P.V., Ismailov M.A., Kharchenko E.V. Improving the shock-abrasive wear resistance of mud pump valve parts // Scientific researches: results and prospects. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 39 - 44. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-39-44.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЫШЕЛЕЖАЩИХ ЭТАЖЕЙ И ЖЕСТКОСТИ ОПОР В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

С.Х. Байрамуков

Северо-Кавказская государственная академия, Черкесск
369015, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Космонавтов, 100
salis_pochta@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ современного состояния методов оценки живучести зданий в условиях экстремальных воздействий. Приведены результаты исследований влияния диссипации энергии в железобетонных элементах конструкций при их внезапной структурной перестройке, вызванной удалением одного из несущих элементов. Установлено влияние граничных условий на внутренние силовые факторы подконструкции при внезапном удалении колонны первого этажа в каркасе здания. В качестве примера рассмотрена подконструкция двухпролетной неразрезной балки, выполненная из тяжелого бетона класса В40 с поперечным сечением 50x100 мм. Приведен расчет изменения общей жесткости железобетонной подконструкции в зависимости от жесткостей податливых опорных узлов и вышележащих этажей. Даны практические рекомендации по повышению живучести рассматриваемых конструктивных систем монолитных зданий и защите их от прогрессирующего обрушения.

Ключевые слова: жесткость, живучесть здания, запроектное воздействие, конструкция, метод расчета, нагружение, податливость, прогиб, прогнозирование, прогрессирующее обрушение, система, строительство.

Abstract. The analysis of the current state of methods for assessing the survivability of buildings under conditions of extreme impacts has been carried out. The results of studies of the effect of energy dissipation in reinforced concrete structural elements during their sudden structural rearrangement caused by the removal of one of the load-bearing elements are presented. The influence of the boundary conditions on the internal force factors of the substructure during the sudden removal of the first floor column in the building frame is established. As an example, a substructure of a two-span continuous beam made of heavy concrete of class B40 with a cross section of 50x100 mm is considered. The calculation of the change in the total stiffness of the reinforced concrete substructure, depending on the stiffness of the compliant support nodes and the overlying floors, is given. Practical recommendations are given to increase the survivability of the considered structural systems of monolithic buildings and protect them from progressive collapse.

Key words: stiffness, building survivability, beyond design basis impact, design, calculation method, loading, compliance, deflection, forecasting, progressive collapse, system, construction.

Введение

Рост численности населения, ввод новых технологических решений и увеличение объемов капитального строительства приводит к неизбежному росту разнообразных видов за-

проектных воздействий. В этих условиях важной задачей, решение которой приводит к снижению количества аварийных ситуаций и ущерба от них, является прогнозирование состояния строительных конструкций и создание

таких методов расчета, которые учитывают видоизменение конструкций при выключении из работы отдельных элементов, связей, закреплений, не приводящих к прогрессирующему разрушению.

При исследовании перераспределения силовых потоков в физически и конструктивно нелинейных системах при удалении одного из несущих элементов важна оценка напряженного состояния в оставшихся элементах конструктивной системы с учетом динамического характера процесса. Для такого анализа предлагается использовать метод декомпозиции и уровневые расчетные модели, приведенные в [1]. При этом важной задачей становится анализ факторов, влияющих на общую жесткость выделяемых из конструктивной системы подконструкций и разработка на этой основе практических рекомендаций проектирования защиты зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения.

Определение жесткостей железобетонной подконструкции

Исследования процесса динамического отклика подконструкции при структурной перестройке конструктивной системы были описаны в работах [2, 3, 5, 6, 7]. Здесь рассмотрены идеализированные расчетные схемы подконструкции с шарнирными или защемленными опорами, в то время как в реальных условиях железобетонная подконструкция в составе всей конструктивной системы опирается на опоры с конкретной угловой жесткостью или защемлена не абсолютно жестко (рисунок 1). Поэтому целью исследования является получить способ определения жесткостей железобетонной подконструкции с учетом влияния вышележащих этажей и жесткостей опорных закреплений на динамический отклик исследуемой подконструкции.

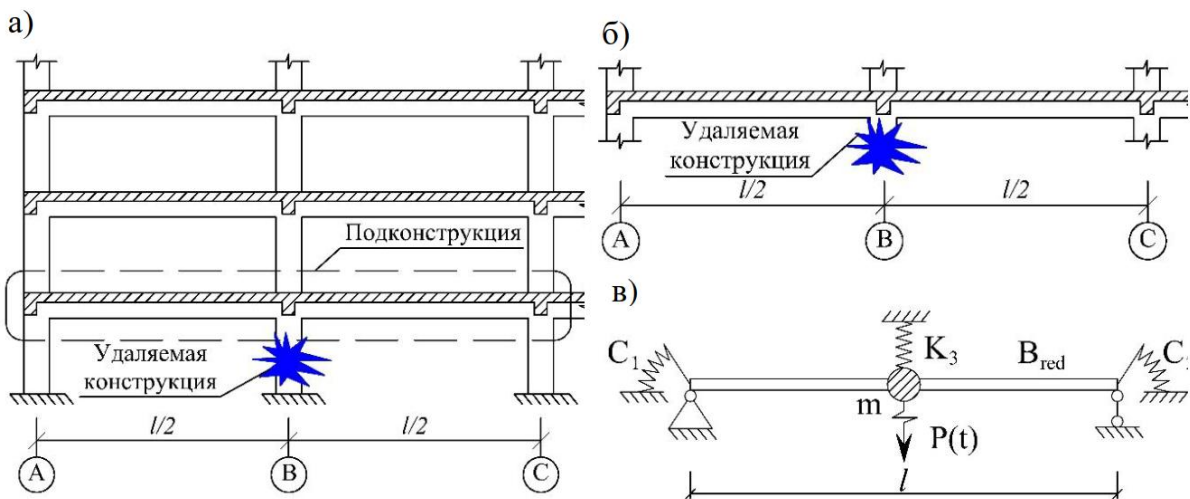


Рисунок 1 – Зона локального разрушения (а), выделенная подконструкция (б) и расчетная схема (в)

Следуя [5, 7, 8, 9] для рассматриваемой подконструкции неразрезной двухпролетной

балки можно записать уравнение движения с одной степенью свободы в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= (u_{st})_o \left[\frac{t}{t_r} - \frac{1-2\zeta^2}{t_r \omega_D} e^{-\zeta \omega_n t} - \frac{2\zeta}{t_r \omega_n} (1 - e^{-\zeta \omega_n t} \cos \omega_D t) \right] \text{ при } 0 < t \leq t_r; \\
 u(t) &= (u_{st})_o \left\{ 1 + \frac{2\zeta}{t_r \omega_n} [e^{-\zeta \omega_n t} \cos \omega_D t - e^{-\zeta \omega_n (t-t_r)} \cos \omega_D (t-t_r)] - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1-2\zeta^2}{t_r \omega_D} [e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_D t - e^{-\zeta \omega_n (t-t_r)} \sin \omega_D (t-t_r)] \right\} \text{ при } t > t_r,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Время динамического догружения подконструкции с учетом времени отказа колонны будет:

$$t_d = \frac{t_r}{2} + \frac{T}{2}, \quad (2)$$

где T – период колебания подконструкции.

Поставив (2) в (1), получим аналитическое выражение значения максимального динамического прогиба подконструкции с учетом вре-

$$u(t)_{\max} = \lim_{t_r \rightarrow 0} \left[(u_{st})_o \left(1 + \frac{2}{\omega_n t_t} \sin \frac{\omega_n t_t}{2} \right) \right] = 2(u_{st})_o = 2 \frac{P_o}{K} \quad (4)$$

В формуле (4) P_o – внешняя нагрузка на подконструкцию.

Из формулы (4) следует, что максимальный динамический прогиб после внезапного удаления колонны обратно пропорционален величине общей жесткости подконструкции K , то есть увеличение живучести конструктивной системы может быть обеспечено увеличением общей жесткости подконструкции.

Рассмотрим факторы, влияющие на значение общей жесткости подконструкции K , применительно к двухпролетной неразрезной балке с различными граничными условиями (рисунок 2, а).

Степень статической неопределимости подконструкции равна 3, то есть подконструкция трижды статически неопределима. Образует основную статически определимую систему, отбросив три лишних связи, и построим эквивалентную систему, заменив действие отброшенных связей неизвестными пока реакциями связей X_1 , X_2 и X_3 (рисунок 2, б), где X_1 , X_2 – изгибающие моменты в упругоподатливых узлах, а X_3 – реакция в пружине, моделирующей линейную жесткость пружины (влияние вышележащих этажей каркаса здания). Неиз-

мени отказа колонны без учета диссипации энергии:

$$u(t)_{\max} = (u_{st})_o \left(1 + \frac{2}{\omega_n t_t} \sin \frac{\omega_n t_t}{2} \right). \quad (3)$$

Несложно видеть, что $u(t)_{\max}$ приближается к двум разам статического прогиба подконструкции при $t_r \rightarrow 0$.

вестные реакции связей X_1 , X_2 и X_3 определяются из канонических уравнений методом сил:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \Delta_{1P_o} = -X_1 / C_1; \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \Delta_{2P_o} = -X_2 / C_2; \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \Delta_{3P_o} = -X_3 / C_3, \end{cases} \quad (5)$$

где $C_1 = X_1 / \varphi_1$, $C_2 = X_2 / \varphi_2$ – угловые жесткости податливых узлов, $K_3 = X_3 / (u_{st})_o$ – линейная жесткость пружины, моделирующей влияние вышележащих этажей каркаса здания.

Коэффициенты податливости вычисляются по известным формулам строительной механики: $\delta_{11} = \delta_{22} = l / 3B_{red}$, $\delta_{12} = \delta_{21} = l / 6B_{red}$, $\delta_{13} = \delta_{31} = \delta_{23} = \delta_{32} = l^2 / 16B_{red}$, $\delta_{33} = l^3 / 48B_{red}$, $\Delta_{1P} = \Delta_{1P} = -P_o \cdot l^2 / 16B_{red}$, $\Delta_{3P} = -P_o \cdot l^3 / 48B_{red}$, где B_{red} – приведенная изгибная жесткость железобетонного сечения подконструкции с учетом трещин на первом этапе статико-динамического нагружения.

Влияние вышележащих этажей. Неизвестные реакции связей X_1 , X_2 и X_3 определяются из канонических уравнений методом сил. Поставляя эти коэффициенты в (5), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{l}{3B_{red}} + \frac{1}{C_1} \right) X_1 + \frac{l}{6B_{red}} X_2 + \frac{l^2}{16B_{red}} X_3 - \frac{P_o l^2}{16B_{red}} = 0 \\ \frac{l}{6B_{red}} X_1 + \left(\frac{l}{3B_{red}} + \frac{1}{C_2} \right) X_2 + \frac{l^2}{16B_{red}} X_3 - \frac{P_o l^2}{16B_{red}} = 0 \\ \frac{l^2}{16B_{red}} X_1 + \frac{l^2}{16B_{red}} X_2 + \left(\frac{l^3}{48B_{red}} + \frac{1}{K_3} \right) X_3 - \frac{P_o l^2}{48B_{red}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

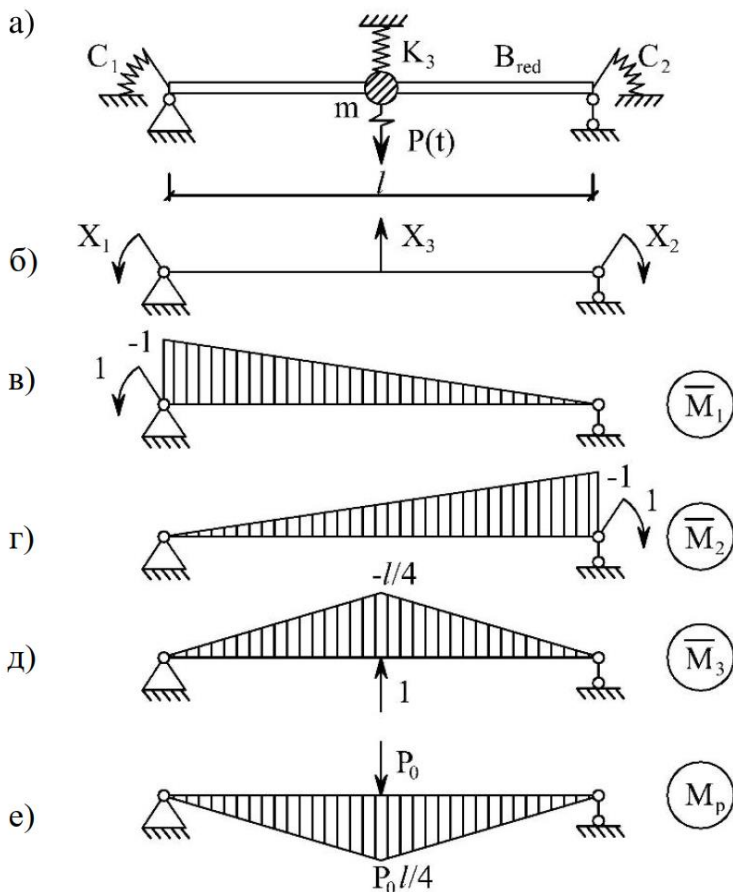


Рисунок 2 – Расчетная (а) и эквивалентная (б) схема подконструкции; в, г, д, е – эпюра изгибающего момента от действия единичных сил и от действия внешних нагрузок, соответственно

Для реальных железобетонных конструкций каркаса здания можно принять, что $C_1 = C_2$. Тогда, решая систему (6), находим:

$$X_1 = X_2 = \frac{24B_{red} \cdot P_o \cdot C_1 \cdot l^2}{384B_{red}^2 + 192B_{red} \cdot C_1 \cdot l + K_3 \cdot (8B_{red} + C_1 \cdot l) \cdot l^3}; \quad (7)$$

$$X_3 = \frac{K_3(8B_{red} + C_1 \cdot l) \cdot l^3 \cdot P_o}{384B_{red}^2 + 192B_{red} \cdot C_1 \cdot l + K_3 \cdot (8B_{red} + C_1 \cdot l) \cdot l^3}; \quad (8)$$

При мгновенном удалении в подконструкции средней опоры (см. рисунок 1, б) и приложении внешней нагрузки P_o , статический прогиб в центральной точке (максимальный статический прогиб подконструкции) составит:

$$(u_{st})_o = \frac{X_3}{K_3} = \frac{(8B_{red} + C_1 \cdot l) \cdot l^3 \cdot P_o}{384B_{red}^2 + 192B_{red} \cdot C_1 \cdot l + K_3 \cdot (8B_{red} + C_1 \cdot l) \cdot l^3}; \quad (9)$$

Общая жесткость железобетонной подконструкции может быть определена из соотношения:

$$K = \frac{P_o}{(u_{st})_o} = \frac{384B_{red}^2 + 192B_{red} \cdot C_1 \cdot l}{(8B_{red} + C_1 \cdot l) \cdot l^3} + K_3; \quad (10)$$

Из анализа формулы (10) следует, что общая жесткость подконструкции зависит от длины пролета l , приведенной изгибной жесткости B_{red} , жесткости податливых опорных узлов C_1 , а также жесткости вышележащих этажей каркаса здания K_3 .

В качестве примера рассмотрим подконструкцию в виде двухпролетной неразрезной балки, выполненную из тяжелого бетона класса В40 с поперечным сечением 50x100 мм. Выбор в качестве примера такой подконструкции обусловлен тем, что подконструкция была

выделена из экспериментально испытанной конструкции двухпролетной трехэтажной железобетонной рамы [1, 4, 5, 8], и имеется возможность прямого сопоставления опытных и теоретических результатов. Балка армирована симметрично по высоте сечения в сжатой и растянутой зонах двумя стержнями диаметром 8 мм класса А500. Пролет подконструкции $l/2$ составляет 1000 мм. Значение приведенной изгибной жесткости железобетонного сечения

подконструкции с учетом образования трещин на первом этапе статико-динамического нагружения при приложении статической части нагрузки, вычислено по уточненной методике [9] и составило $49,2 \text{ кНм}^2$. Тогда вычисления жесткости по формуле (10) можно представить в виде графиков, описывающих влияние жесткостей податливых узлов C_1 и вышележащих этажей каркаса здания K_3 на общую жесткость подконструкции (рисунок 3).

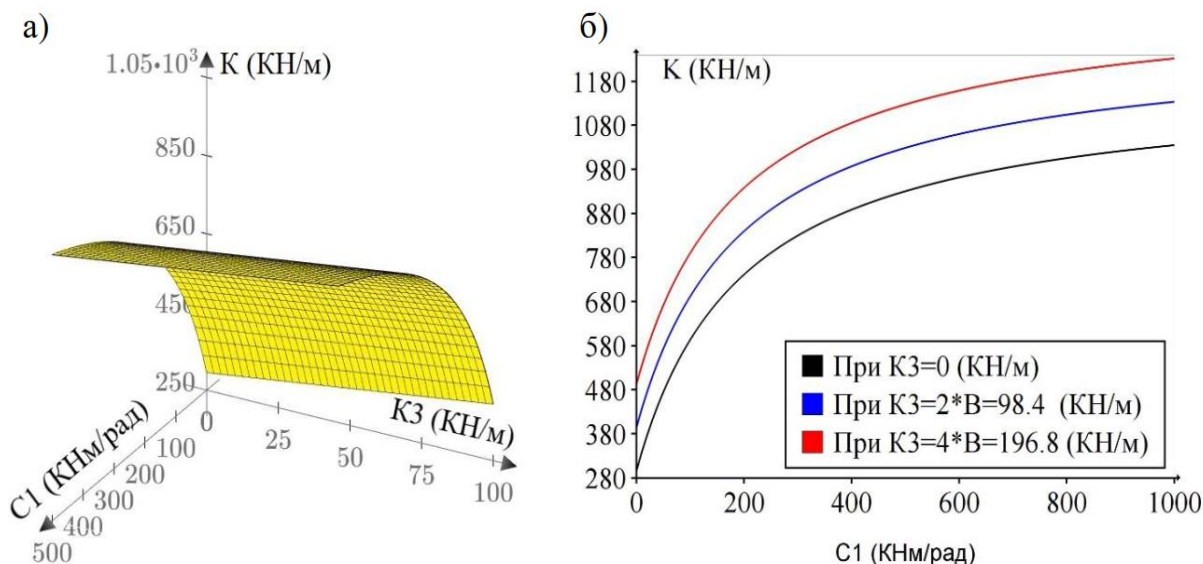


Рисунок 3 – Изменение общей жесткости железобетонной подконструкции K в зависимости от жесткостей податливых опорных узлов C_1 и вышележащих этажей K_3 : а – 3D графика, б – 2D графика при $K_3 = 0$; $K_3 = 2B_{red}$ и $K_3 = 4B_{red}$, соответственно

Анализ приведенных графиков позволяет отметить следующее: при $K_3 = 0$ и $C_1 \rightarrow 0$ получаем известную формулу жесткости для балки с шарнирными опорами $K = 48B/l^3$. При $K_3 = 0$ и $C_1 \rightarrow +\infty$, получаем известную формулу жесткости для балки с защемленными опорами

$$K = \lim_{C_1 \rightarrow \infty} \frac{384B^2 + 192B \cdot C_1 \cdot l}{(8B + C_1 \cdot l) \cdot l^3} = \frac{192B}{l^3}.$$

Соответственно, при увеличении K_3 , общая жесткость исследуемой железобетонной подконструкции возрастает.

Выводы

Проведенный анализ и полученные теоретические расчетные зависимости позволяют сформулировать некоторые рекомендации по повышению живучести железобетонных моно-

литных каркасов многоэтажных зданий с целью их защиты от прогрессирующего обрушения при особых воздействиях.

1. Повышение приведенной изгибной жесткости (B_{red}) конструкций ригелей перекрытия над первым этажом за счет увеличения высоты поперечного сечения ригелей.

2. Использование двойного рабочего армирования в конструкциях диска перекрытия над первым этажом, обеспечивающего восприятие перераспределенных усилий в зонах удаления колонн первого этажа.

3. Повышение жесткости опорных узлов (C_1) подконструкций за счет увеличения сечений в зонах сопряжения колонн и ригелей, а также за счет обеспечения неразрезности всех элементов в сборно-монолитном диске перекрытия путем установки дополнительной, в

том числе, пренапряженной арматуры в зонах знакопеременных усилий при особом воздействии.

4. Повышение жесткости вышележащих этажей K_3 и всей конструктивной системы каркаса здания за счет устройства аутригерных этажей и других элементов жесткости.

5. Уменьшение собственного веса здания с помощью применения высокопрочного и лег-

кого железобетона и фиброжелезобетона [3], постановка контурных и внутренних горизонтальных связей в плоскости дисков перекрытий, вертикальных связей по направлению колонн на всю высоту здания, учет на статическую работу каркаса здания жесткостей заполнения самонесущих перегородок и стен из мелкоштучных материалов.

Библиографический список

1. Федорова Н.В., Кореньков П.А. Статико-динамическое деформирование монолитных железобетонных каркасов зданий в предельных и запредельных состояниях // Строительство и реконструкция. 2016. № 6 (62). С. 90-100.
2. Drar H. On predicting the temperature and strain rate dependences of the fracture toughness of plain carbon steels // Materials Characterization. 1993. Т. 31. № 2. С. 91-97.
3. Eurocode 2: EN 1992-1-1:2004: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels. 2004. 225 p.
4. Fedorova N., Kolchunov V., Tuyen V.N., Dinh Quoc P., Medyankin M. The dynamic effect in a structural adjustment of reinforced concrete structural system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. Т. 869. Pp. 052078.
5. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Т. 1425. Pp. 012033.
6. Fedorova N.V., Vu N.T. Deformation diagrams of reinforced concrete elements of constructive systems under special actions // Magazine of Civil Engineering. 2020.
7. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Т. 896. № 1. Pp. 012040.
8. Kolchunov V.I., Androsova N.B. Nonequilibrium processes of power and environmental resistance of reinforced concrete structures to progressive collapse // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Т. 1425.
9. Верюжский Ю.В. и др. Справочное пособие по строительной механике. Т.1,2. М.: АСВ, 2014. 433 с.

Referenses

1. Fedorova N.V., Koren'kov P.A. Statiko-dinamicheskoe deformirovanie monolitnyh zhelezobetonnyh karkasov zdaniy v predel'nyh i zapredel'nyh sostoyaniyah // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2016. № 6 (62). С. 90-100.
2. Drar H. On predicting the temperature and strain rate dependences of the fracture toughness of plain carbon steels // Materials Characterization. 1993. Т. 31. № 2. С. 91-97.
3. Eurocode 2: EN 1992-1-1:2004: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels. 2004. 225 p.
4. Fedorova N., Kolchunov V., Tuyen V.N., Dinh Quoc P., Medyankin M. The dynamic effect in a structural adjustment of reinforced concrete structural system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. Т. 869. Pp. 052078.
5. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Т. 1425. Pp. 012033.
6. Fedorova N.V., Vu N.T. Deformation diagrams of reinforced concrete elements of constructive systems under special actions // Magazine of Civil Engineering. 2020.
7. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Т. 896. № 1. Pp. 012040.
8. Kolchunov V.I., Androsova N.B. Nonequilibrium processes of power and environmental resistance of reinforced concrete structures to progressive collapse // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Т. 1425.
9. Veryuzhskij YU.V. i dr. Spravochnoe posobie po stroitel'noj mekhanike. Т. 1,2. М.: ASV, 2014. 433 с.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

The author declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 17.01.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 12.03.2023

Принята к публикации / Accepted 19.03.2023

© С.Х. Байрамуков, 2023

Сведения об авторе

List of Author

Байрамуков Салис Хамидович – доктор технических наук, профессор кафедры строительства и управления недвижимостью Северо-Кавказской государственной академии.

Salis Bayramukov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction and Real Estate Management, North Caucasus State Academy.

Ссылка для цитирования: *Байрамуков С.Х.* Определение жесткости железобетонной конструкции с учетом влияния вышележащих этажей и жесткости опор в условиях экстремальных воздействий // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 1. С. 45 - 51. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-45-51.

For citation: *Bairamukov S.Kh.* Determination of the rigidity of a reinforced concrete structure, taking into account the influence of the overlying floors and the rigidity of the supports under conditions of extreme impacts // Scientific researches: results and prospects. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 45 - 51. (in Russ.). doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-45-51.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.В. Муцанов, М.Н. Цепляев

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, Макеевка
286123, Россия, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, 2
mushhanov93@gmail.com

Аннотация: В работе рассмотрены особенности создания уточненных конечно-элементных моделей стержневых элементов структурных покрытий и стенок вертикальных цилиндрических резервуаров. На основе реализованной детализации выполнена уточненная оценка несущей способности этих конструктивных элементов из условий устойчивости, позволившая зафиксировать резервы несущей способности в пределах 10..45%.

Ключевые слова: вертикальные цилиндрические резервуары, конечно-элементный анализ, пространственные металлические конструкции, структурные покрытия, устойчивость.

Abstract: The paper considers the features of creating refined finite element models of rod elements of structural coatings and walls of vertical cylindrical tanks. Based on the implemented detailing, an updated assessment of the bearing capacity of these structural elements from the stability conditions was made, which made it possible to fix the reserves of the bearing capacity within 10..45%.

Key words: vertical cylindrical tanks, finite element analysis, spatial metal structures, structural coatings, stability.

Введение

На сегодняшний день, несмотря на все возрастающую тенденцию использования альтернативных источников энергии, потребность в нефти и нефтепродуктах будет возрастать еще, как минимум, 20 лет. Следует отметить, что для хранения нефти и нефтепродуктов чаще всего используются вертикальные цилиндрические резервуары большого объема от 10 000 до 100 000 м³. Таким сооружениям в нормативных документах разных стран присвоен наивысший класс опасности, поскольку при разливе хранящегося продукта, помимо очевидного ущерба, наносится серьезный вред экологии.

Также с повышением надежности таких конструкций растет их применение для хранения технологических жидкостей и воды на химических и других предприятиях. При этом до сих пор существует ряд проблем, возникающих в процессе эксплуатации резервуара,

требующих решения на этапе проектирования. В частности, такой проблемой являются эффекты местной потери устойчивости элементами стенки резервуара, которые могут привести к общей потере устойчивости и разрушению конструкции. Для стран СНГ, где парк эксплуатируемых металлических конструкций имеет существенный физический износ, актуальной проблемой является обеспечение надежности резервуаров, запроектированных 20-30 лет назад и эксплуатирующихся до сих пор [1]. Хотя все нормативные документы предусматривают расчет на устойчивость, в реальных конструкциях часто можно различить дефекты (рисунок 1). Для предотвращения подобных ситуаций существует два наиболее распространенных конструктивных решения: увеличение толщины стенки или постановка колец жесткости. Во втором случае конструкция становится более экономичной, однако появляется ряд дополнительных тех-

нологических процессов, связанных с их изготовлением и монтажом.



Рисунок 1 – Потеря устойчивости верхних поясов стенок резервуара [1]

Одним из ключевых вопросов, возникающих при проектировании пространственных металлических конструкций, является обеспечение устойчивости их основных конструктивных элементов [2, 3]. В статье на примере стержневых элементов структурных большепролетных покрытий и стенок вертикальных цилиндрических резервуаров больших объемов этот вопрос решается на основе детализации расчетных конечно-элементных схем, что отражает тренд современных исследований в части уточнения напряженно-деформированного состояния и действительной работы элементов конструкций. Таким образом, основной целью представляемого ис-

следования является уточнение параметров напряженно-деформированного состояния стержневых элементов структурных покрытий и стенок вертикальных цилиндрических резервуаров, выполняемое при оценке их устойчивости, и полученное в результате детализации схем при конечно-элементных расчетах.

Стержневые элементы структурных покрытий

Варьируемыми параметрами в исследовании выступают размеры конструкции узлового соединения структурного покрытия типа МЕРО/МАРХИ и гибкость раскосов. Формирование расчётной модели в программном комплексе ЛИРА-САПР реализовывалось созданием оболочечной модели трубы и узловых соединений и заданием для начального геометрического несовершенства в виде общей погибы полуволны синусоиды с максимальным отклонением в центре стержня ($f/l = 1/700$).

Методология исследования основана на сравнении результатов исследования устойчивости пространственного стержня без моделирования узлового соединения (рисунок 2а), стержня с моделированием шарнирного закрепления коннектора, допускающее податливость коннектора (рисунок 2б), и моделирование стержня с жестким закреплением, отражающее работу узла в составе структурного покрытия (рисунок 2в).

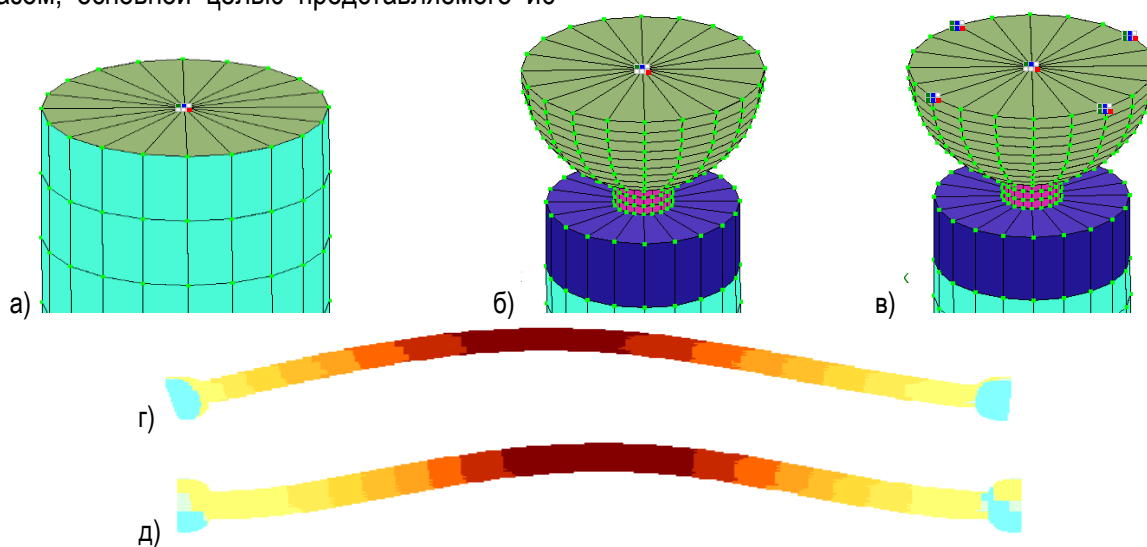


Рисунок 1 – Варианты расчетных схем:

- а) (г) – без узлового моделирования; б) (д) – шарнирное закрепление (податливость);
- в) (е) – жесткое защемление (в составе покрытия); г) деформированная схема для варианта б);
- д) деформированная схема для варианта в)

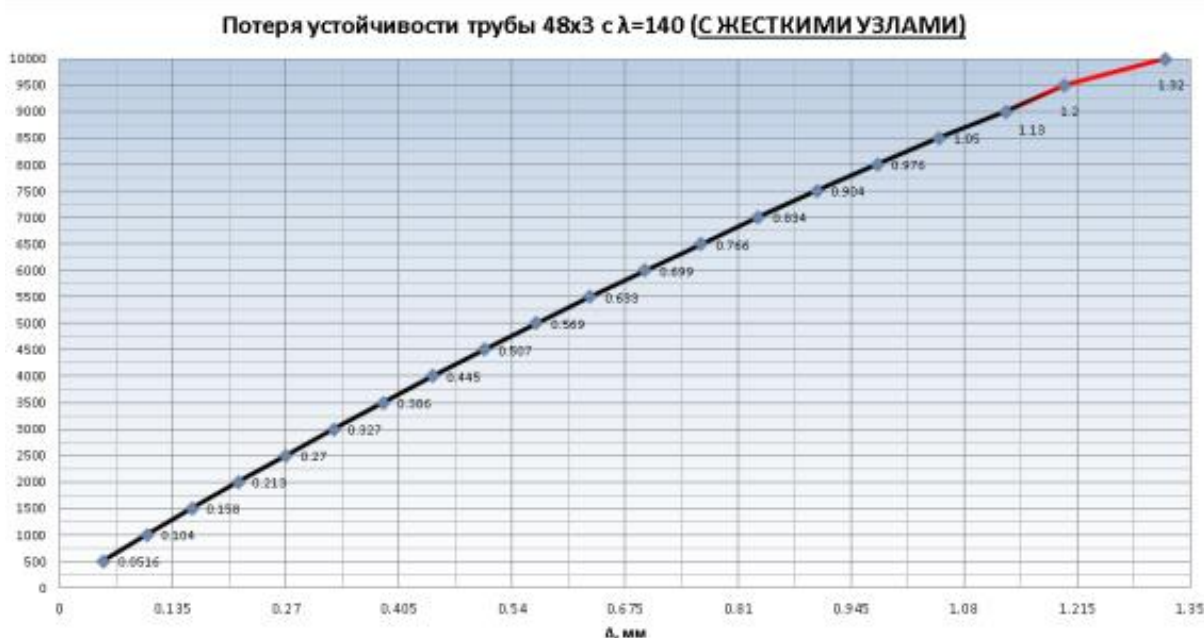


Рисунок 2 – Зависимость напряжение-перемещение

С целью возможности выполнения расчетов центрально-сжатых стержней из условия устойчивости в традиционной для отечественных норм проектирования форме на основе установленной зависимости, представленной в выводе определены значения коэффициента приведения геометрической длины стержня

к расчетной (μ), и коэффициента продольного изгиба φ (для стали $R_y = 240$ МПа), учитывающих гибкость и степень защемления стержня в соединениях структурных конструкций с шаровыми вставками-коннекторами

Таблица – Зависимости μ - λ , φ - λ

λ	50	60	70	80	90	100	110	120
μ	0.83	0.88	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95
φ	0.933	0.892	0.854	0.820	0.789	0.760	0.739	0.721

Стенки вертикальных цилиндрических резервуаров

Действительная работа расчётной модели вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР) в разрезе изучения устойчивости стенки определяется: дискретизацией сетки конечных элементов, параметрами нагрузки, детализацией отдельных элементов конструкции. Ранее выполненные исследования позволили определить наилучшее расположение и шаг кольцевых рёбер жёсткости, повышающие устойчивость до 20% по сравнению с типовыми решениями [4]. Особенности моделирования кольцевых лестниц для обслуживания ВЦР и их влияние на устойчивость стенки являются логическим продолжением указанной выше тематики. Варьируемыми параметрами

исследования выступали: конструктивный вариант лестницы (В2 и В1 – рисунок 3а, 3б), угол наклона лестниц к горизонту ($30^\circ..50$, шаг 5°), объём резервуара (10, 20, 30 тыс. м³). Матрица эксперимента включает в себя 33 варианта. С учётом исследований [5, 6] в программном комплексе *LIRA-SAPR 2019 R1* сформирована конечно-элементная модель ВЦР для расчёта устойчивости (рисунок 3д). Расчётной нагрузкой принимается сочетание ветра (500 Па) и вакуума (250 Па). Распределение ветрового потока учитывало наличие винтовой лестницы. Уточнённые графики изменения аэродинамического коэффициента C_e были определены с использованием программного комплекса *SolidWorks Flow Simulation* (рисунок 3в).

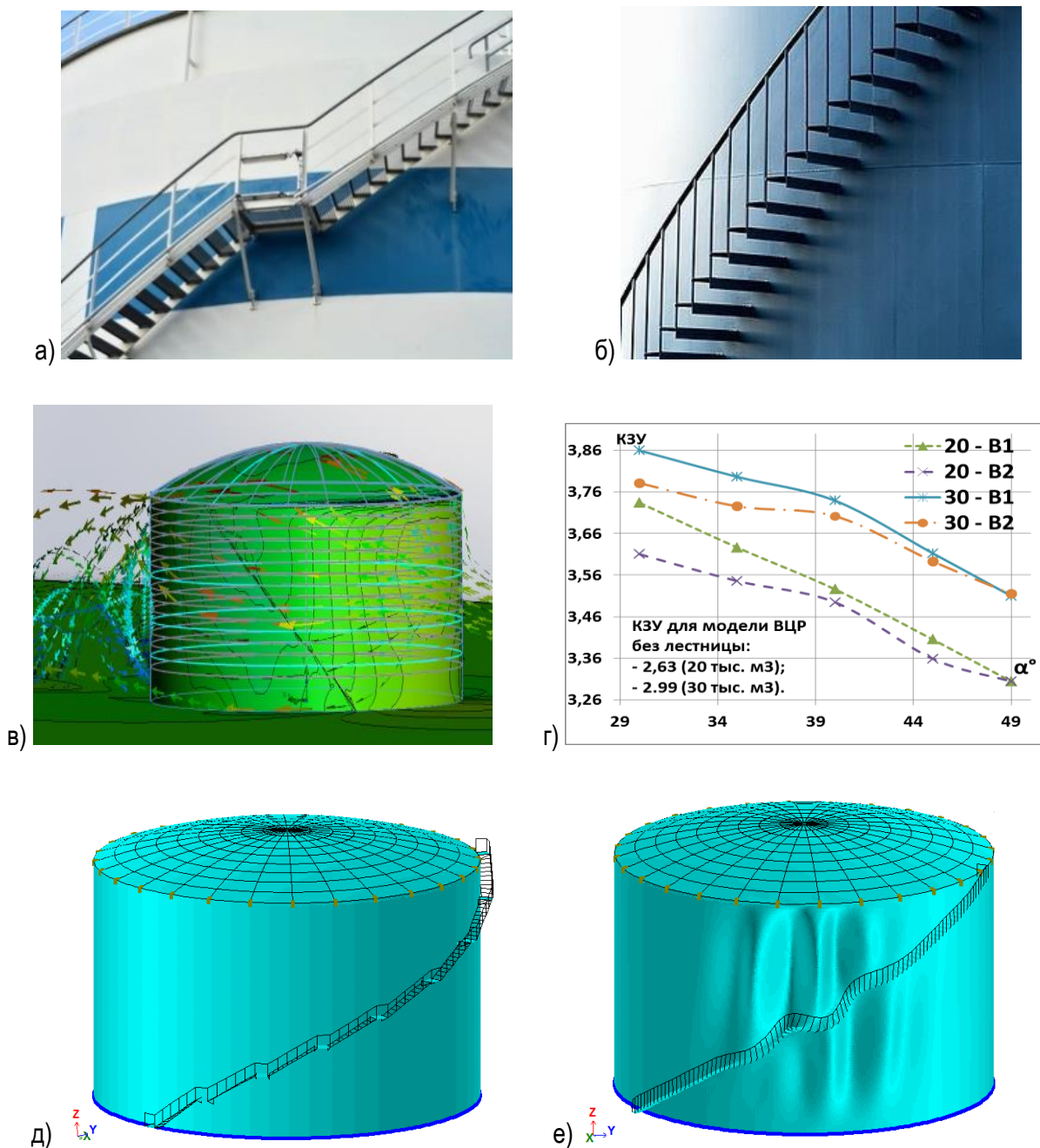


Рисунок 3 – Особенности моделирования и результаты расчёта ВЦР
 а) винтовая лестница – В2; б) винтовая лестница – В1; в) модель в SolidWorks для расчёта ветрового давления; г) графики изменения КЗУ; д) модель ВЦР в LIRA-SAPR 2019 R1; е) форма потери устойчивости ВЦР

Основным показателем результатов исследования принят коэффициент запаса устойчивости, определяемый непосредственно в программе LIRA-SAPR 2019 R1 (форма потери устойчивости рисунок 3е), графики изменения коэффициента запаса устойчивости в зависимости от уклона и конструктивного решения лестницы – на рисунке 3г. Коэффициент определяется отношением действующей

нагрузки к предельно допустимой. Учёт в моделях лестниц существенно повышает значение кольцевых критических напряжений потери устойчивости (σ_{cr}) до 25..46%, а объёмное моделирование позволило выбрать винтовую лестницу В1, как наиболее предпочтительный конструктивный вариант. Полученные результаты коррелируют с результатами аналогичного исследования по основным параметрам [4].

Заключение

1. Уточненная несущая способность центрально-сжатых стержней структурных покрытий из условия устойчивости с достаточной для практических расчетов точностью может быть описана зависимостью $\sigma_{кр}^p = 0,0004\lambda^2 - 0,1536\lambda + 28,681$, установленной с учетом влияния узловых соединений на вид деформированной оси стержня, а также

пространственную работу стержня-оболочки.

2. Применение лестницы В1 повышает величину σ_{cr} до 6% по сравнению с В2. При этом максимальное возрастание устойчивости стенки наблюдается при уклонах лестницы к горизонту в диапазоне 30..40°. Полноразмерное моделирование лестницы с учётом фактического аэродинамического коэффициента C_e позволяет повысить σ_{cr} в диапазоне 40..46%.

Библиографический список

1. Муцанов А.В., Цепляев М.Н. Сравнительный анализ эффективности конструктивных и расчетных методов обеспечения устойчивости стенок вертикальных цилиндрических резервуаров // Металлические конструкции. 2017. Т. 23. № 3. С. 123-137.
2. Лейтес С.Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954. 305 с.
3. Муцанов А.В. Действительная работа и формообразование стержневых структурных покрытий на нетиповом плане // дис. канд. техн. наук: 05.23.01. ГОУ ВПО ДонНАСА, Макеевка, 2022. 185 с. [Режим доступа: http://donnasa.ru/docs/DS/D_01.006.02/Muschanov_A.V/5._Dissertatciya_Mushchanov_A.V.pdf].
4. Муцанов В.Ф., Цепляев М.Н. Обеспечение устойчивости стенок резервуаров на основе рационального расположения колец жёсткости // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 9 (72). С. 58-73.
5. Tsepiliev M.N., Zubenko A.V., Mushchanov V.P. The stress state of a tank shell in the group under wind load // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 7 (83). Pp. 49-62.
6. Shokrzadeh, A.R., Mansuri, F., Asadi, M., Sohrabi, M. R. Comparative Analysis on Buckling Behavior of Steel Cylindrical Tanks by Consideration of More Realistic Numerical Models // Proceedings of 5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering. CSEE'20. Lisbon, 2020.

Referenses

1. Mushchanov A.V., Ceplyaev M.N. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti konstruktivnyh i raschetnyh metodov obespecheniya ustojchivosti stенок vertikal'nyh cilindricheskikh rezervuarov // Metallicheskie konstrukcii. 2017. T. 23. № 3. S. 123-137.
2. Lejtes S.D. Ustojchivost' szhatyh stal'nyh stержnej. M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arhitekture, 1954. 305 s.
3. Mushchanov A.V. Dejstvitel'naya rabota i formoobrazovanie stержnevyyh strukturnyyh pokrytij na netipovom plane // dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. GOU VPO DonNASA, Makeevka, 2022. 185 s. [Rezhim dostupa: http://donnasa.ru/docs/DS/D_01.006.02/Muschanov_A.V/5._Dissertatciya_Mushchanov_A.V.pdf].
4. Mushchanov V.F., Ceplyaev M.N. Obespechenie ustojchivosti stенок rezervuarov na osnove racional'nogo raspolozheniya kolec zhyostkosti // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniij i sooruzhenij. 2018. № 9 (72). S. 58-73.
5. Tsepiliev M.N., Zubenko A.V., Mushchanov V.P. The stress state of a tank shell in the group under wind load // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2018. № 7 (83). Pp. 49-62.
6. Shokrzadeh, A.R., Mansuri, F., Asadi, M., Sohrabi, M. R. Comparative Analysis on Buckling Behavior of Steel Cylindrical Tanks by Consideration of More Realistic Numerical Models // Proceedings of 5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering. CSEE'20. Lisbon, 2020.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests

Дата поступления в редакцию / Received 28.12.2022

Одобрена после рецензирования / Revised 19.01.2023

Принята к публикации / Accepted 07.02.2023

© А.В. Муцанов, М.Н. Цепляев, 2023

Сведения об авторе
List of Author

Муцанов Александр Владимирович – кандидат технических наук, ассистент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Alexander Mushchanov – Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Metal Structures and Structures, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture.

Цепляев Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Maxim Tseplyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture.

Ссылка для цитирования: *Муцанов А.В., Цепляев М.Н.* Оценка устойчивости стержневых элементов пространственных металлических конструкций // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4, № 1. С. 52 - 57. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-52-57.

For citation: *Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N.* Evaluation of the stability of bar elements of spatial metal structures // Scientific research: results and prospects. 2023. Vol. 4, No. 1. P. 52 - 57. doi: 10.21822/2713-220X-2023-4-1-52-57.

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Научные исследования: итоги и перспективы», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора «MS Word 2007» (параметры страницы – А4; поля – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал – 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте: naukajournal@mail.ru.

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов. Текст статьи должен быть четко структурирован и иметь подзаголовки: введение, теоретические и (или) экспериментальные исследования, заключение, список литературы.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности: – инициалы и фамилии авторов, – полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные), – краткая (5-7 строк) аннотация (курсив), – ключевые слова (5-7 слов). Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке. Затем идет текст самой статьи и библиографический список. Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке. Количество авторов рекомендуется не более пяти.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий. Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, Quattro Pro, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны во встроенном редакторе формул. Каждая формула, на которую есть ссылка в статье, должна иметь номер, расположенный у правой границы поля страницы.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т.е., и т.д., и т.п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Библиографический список должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц. Нумерация источников указывается в порядке упоминания в тексте.

8. При необходимости к статье прилагаются заключение о возможности открытого опубликования и экспертное заключение комиссии по экспортному контролю.

9. Все статьи проходят проверку на оригинальность.

10. Статья рецензируется ведущим учёным в данной области, как правило, доктором наук.

11. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

12. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

13. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Датой поступления статьи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

14. Статьи публикуются бесплатно.

«Научные исследования; итоги и перспективы» – рецензируемый научно-технический журнал, публикующий статьи по следующим научным направлениям и специальностям:

05.12.00 – Радиотехника и связь.

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии. 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

05.02.00 – Машиностроение и машиноведение

05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин. 05.02.04 – Трение и износ в машинах. 05.02.08 – Технология машиностроения.

05.27.00 – Электроника.

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

05.22.00 – Транспорт.

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте. 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта.

25.00.00 – Науки о Земле.

25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ. 25.00.35 – Геоинформатика.

05.18.00 – Технология продовольственных продуктов.

05.18.01 – Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов плодоовощной продукции и виноградарства. 05.18.06 – Технология жиров, эфирных масел и парфюмерно-косметических продуктов. 05.18.07 – Биотехнология пищевых продуктов и биологических активных веществ. 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств. 05.18.15 – Технология и товароведение пищевых продуктов и функционального и специализированного назначения и общественного питания.

05.23.00 – Строительство.

05.23.21 – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. 05.23.07 – Гидротехническое строительство. 05.23.16 – Гидравлика и инженерная гидрология.

05.17.00 – Химическая технология.

05.17.01 – Технология неорганических веществ. 05.17.04 – Технология органических веществ. 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов. 05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ.

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:
итоги и перспективы
2023 № 1 (Том 4)**

**SCIENTIFIC RESEARCHES:
results and prospects
2023 № 1 (Vol. 4)**

Ответственный за выпуск – Ирзаев Г.Х.
Компьютерная верстка – Джабуева Ж.И
Дизайн обложки – Тагиев М.Х.

Подписано в печать 27.03.2023 г. Дата выхода в свет 29.03.2023 г.
Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 8,32. Уч.-изд. л. 3,76. Тираж 500. Заказ № 35

Электронная версия журнала
«Научные исследования: итоги и перспективы»
размещена на сайте www.dstu.ru

Учредитель/редакция/издатель
Дагестанский государственный технический университет
Адрес: 367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70.
Тел. +7 (8722) 62 37 15
E-mail: naukajournal@mail.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ИП Тагиева Р.Х.
г. Махачкала, ул. Батырая, 149. Тел.: 8 928 048 10 45

“ ф о р м а т ”