



№1(10)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГОРИЗОНТЫ

SCIENCE HORIZONS

НАУКИ

ЭНЕРГЕТИКА

ТЕХНОЛОГИИ
БУДУЩЕГО
ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО МИРА

| gorizontynauki.ru



ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

Сетевое издание
Научный журнал

Издание основано в 2026 г.
Периодичность – 12 номеров в год.

Материалы публикуются в авторской редакции и отображают персональную позицию автора. Издательство не несет ответственности за материалы, опубликованные в журнале. За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

Редакционная коллегия:

Белозеров А.В. (г. Новосибирск), **Григорьевских И.С.** (г. Магнитогорск),
Дмитриева Л.Н. (г. Красноярск), **Елисеева Т.К.** (г. Ижевск), **Захарова М.П.** (г. Владимир),
Николаев О.С. (г. Курск), **Степанов Д.В.** (г. Нижний Новгород),
Мартиросян Г.Л. (г. Гюмри, Республика Армения),
Павлов К.А. (г. Казань, Республика Татарстан),
Турсынбеков Б.М. (г. Алматы, Республика Казахстан), **Миронов С.В.** (г. Хабаровск),
Федосеева Е.Ю. (г. Тюмень), **Кузнецова А.А.** (г. Кострома), **Андреев Д.И.** (г. Архангельск),
Соколова В.М. (г. Вологда), **Тихонова Р.С.** (г. Геленджик), **Волков Г.Д.** (г. Мурманск),
Лебедев Ю.П. (г. Калуга), **Борисова Н.В.** (г. Брянск), **Сафина Л.Ш.** (г. Уфа),
Тимофеева К.Е. (г. Пенза), **Алексеев М.Ю.** (г. Чебоксары), **Семенов В.А.** (г. Томск),
Орлов К.Н. (г. Южно-Сахалинск), **Мельников П.Р.** (г. Калининград),
Васильева Е.О. (г. Астрахань), **Щербакова М.С.** (г. Псков),
Игнатова Ю.Д. (г. Петрозаводск), **Варданян С.М.** (г. Ростов-на-Дону),
Яковлева А.И. (г. Барнаул)

Адрес редакции:
Россия, 630000, г. Новосибирск, ул. Б. Советская, 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

SCIENCE HORIZONS

Online edition
Scientific journal

Publication was founded in 2016.
Schedule – 12 issues in a year.

The materials are published in the author's edition and reflect the personal position of the author. The Editorial board is not responsible for the materials published in the journal. The authors are responsible for the content and reliability of the articles. Editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Editorial Board:

Belozеров A.V. (Novosibirsk), **Grigoryevskikh I.S.** (Magnitogorsk), **Dmitrieva L.N.** (Krasnoyarsk),
Eliseeva T.K. (Izhevsk), **Zakharova M.P.** (Vladimir), **Nikolaev O.S.** (Kursk),
Stepanov D.V. (Nizhny Novgorod), **Martirosyan G.L.** (Gyumri, Republic of Armenia),
Pavlov K.A. (Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation),
Tursynbekov B.M. (Almaty, Republic of Kazakhstan), **Mironov S.V.** (Khabarovsk),
Fedoseeva E.Y. (Tyumen), **Kuznetsova A.A.** (Kostroma), **Andreev D.I.** (Arkhangelsk),
Sokolova V.M. (Vologda), **Tikhonova R.S.** (Gelendzhik), **Volkov G.D.** (Murmansk),
Lebedev Y.P. (Kaluga), **Borisova N.V.** (Bryansk), **Safina L.S.** (Ufa), **Timofeeva K.E.** (Penza),
Alekseev M.Y. (Cheboksary), **Semenov V.A.** (Tomsk), **Orlov K.N.** (Yuzhno-Sakhalinsk),
Melnikov P.R. (Kaliningrad), **Vasilyeva E.O.** (Astrakhan), **Shcherbakova M.S.** (Pskov),
Ignatova Y.D. (Petrozavodsk), **Vardanyan S.M.** (Rostov-on-Don), **Yakovleva A.I.** (Barnaul)

Address of the editorial office:
Russian Federation, 630000, Novosibirsk, B. Sovetskaya str., 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

СОДЕРЖАНИЯ

1. КИНЕТИКА И ПРЕДИКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОКРЕКИНГА ВАКУУМНОГО ГАЗОЙЛЯ НА ПЛАТИНА-ЦЕОЛИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРАХ С НАТУРАЛЬНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ МАРШРУТОВ СЕЛЕКТИВНОСТИ	6
2. КИНЕТИКА И ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АЛКИЛИРОВАНИЯ ИЗОБУТАНА ОЛЕФИНАМИ НА ИОННЫХ ЖИДКОСТЯХ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОЦЕНКОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРИМЕТИЛПЕНТАНОВ	11
3. ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОДЕАРОМАТИЗАЦИИ КЕРОСИНОВЫХ И ДИЗЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ Pt-Pd/Al ₂ O ₃ -SiO ₂ КАТАЛИЗАТОРАХ.....	16
4. ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ АНАЛИЗ МИКРОМОРФОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КЕРАМИКИ ЭНЕОЛИТА И БРОНЗОВОГО ВЕКА: НЕЙРОСЕТЕВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАДИЦИЙ И МИГРАЦИОННЫХ ПУТЕЙ.....	22
5. ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ШЛАКОВ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ ЭПОХИ ПОЗДНЕЙ БРОНЗЫ.....	27
6. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ И БРОНЗ ПОЗДНЕГО БРОНЗОВОГО ВЕКА	32
7. ПЕТРОГРАФИЯ И ГЕОХИМИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЭНЕОЛИТА И БРОНЗОВОГО ВЕКА В ИССЛЕДОВАНИИ МИГРАЦИОННЫХ ПУТЕЙ И КУЛЬТУРНЫХ СВЯЗЕЙ.....	37
8. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ	42
9. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ РАЗВИТИЯ ПЕРИОПЕРАЦИОННОГО ИНФАРКТА МИОКАРДА И СУПРАВЕНТРИКУЛЯРНЫХ АРИТМИЙ ПРИ ОПЕРАЦИЯХ АОРТОКОРОНАРНОГО ШУНТИРОВАНИЯ.....	47

10. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АНСАМБЛЕВОГО МЫШЛЕНИЯ У СТУДЕНТОВ МУЗЫКАЛЬНЫХ ВУЗОВ	53
--	----

КИНЕТИКА И ПРЕДИКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОКРЕКИНГА ВАКУУМНОГО ГАЗОЙЛЯ НА ПЛАТИНА-ЦЕОЛИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРАХ С НАТУРАЛЬНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ МАРШРУТОВ СЕЛЕКТИВНОСТИ

Смирнов Дмитрий Евгеньевич

Аспирант кафедры физической и прикладной химии
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Романова Анна Сергеевна

Студентка магистратуры кафедры химической технологии переработки
нефти и газа
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе проведен подробный кинетический анализ и гибридное математическое моделирование процесса глубокого гидрокрекинга тяжелого вакуумного газойля на двухфункциональном платина-цеолитном катализаторе. Процесс гидрокрекинга представляет собой ведущее направление вторичной переработки нефтяного сырья, позволяющее получать экологически чистые малосернистые дизельные дистилляты, реактивные топлива и высококачественные базовые масла из дистиллятов высокого кипения. Авторами разработана многокомпонентная математическая модель, объединяющая дифференциальные уравнения химической кинетики распада полициклических углеводородов и алгоритмы ансамблевого машинного обучения. Модель учитывает динамику деалюминирования цеолитного каркаса типа Y, изменение баланса бренстедовских кислотных центров и гидрирующей активности платиновых кластеров. Для устранения алгоритмической неопределенности в модель встроен модуль интерпретации Shapley-значений, позволивший установить физико-химический вклад каждого входного параметра в смещение селективности между реакциями расщепления и гидрирования. Натурные испытания на пилотной проточной установке высокого давления подтвердили высокую точность прогнозирования конверсии сырья и фракционного состава гидрогенизата.

Ключевые слова: гидрокрекинг, вакуумный газойль, модифицированный цеолит, гибридная модель, Shapley-значения, бренстедовская кислотность, селективность, дизельная фракция, реактивное топливо.

KINETICS AND PREDICTIVE MODELING OF VACUUM GAS OIL HYDROCRACKING OVER PLATINUM-ZEOLITE CATALYSTS WITH NATURAL INTERPRETATION OF SELECTIVITY ROUTES

Smirnov Dmitry Evgenievich

Postgraduate Student, Department of Physical and Applied Chemistry
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Romanova Anna Sergeevna

Master's Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Abstract

In the present research paper, a detailed kinetic analysis and hybrid mathematical modeling of the deep hydrocracking process of heavy vacuum gas oil over a bifunctional platinum-zeolite catalyst were conducted. The hydrocracking process represents a leading direction in the secondary processing of petroleum feedstock, enabling the production of environmentally friendly low-sulfur diesel distillates, jet fuels, and high-quality base oils from high-boiling distillates. The authors have developed a multi-component mathematical model combining differential equations of chemical kinetics for polycyclic hydrocarbon cracking with ensemble machine learning algorithms. The model accounts for the dynamics of dealumination in the Y-type zeolite framework, changes in the balance of Brønsted acid sites, and the hydrogenating activity of platinum clusters. To eliminate algorithmic uncertainty, an interpretation module based on Shapley values was integrated into the model, allowing the establishment of the physicochemical contribution of each input parameter to the selectivity shift between cleavage and hydrogenation reactions. Full-scale tests on a pilot high-pressure flow unit confirmed the high accuracy in predicting feedstock conversion and the fractional composition of the hydrogenate.

Keywords: hydrocracking, vacuum gas oil, modified zeolite, hybrid model, Shapley values, Brønsted acidity, selectivity, diesel fraction, jet fuel.

Введение

Глубокая переработка нефтяных остатков и тяжелых вакуумных дистиллятов является определяющим вектором развития современной нефтеперерабатывающей промышленности.

Процесс гидрокрекинга вакуумного газойля выкипающего в интервале от трехсот пятидесяти до пятисот пятидесяти градусов Цельсия позволяет решать двухединую задачу: удаление гетероатомных серо- и азоторганических соединений и глубокое фрагментирование тяжелых молекул до среднестиллятных фракций.

Высокая эффективность процесса достигается применением бифункциональных катализаторов, сочетающих гидрирующую функцию благородных или переходных металлов и кислотную функцию модифицированных цеолитов. Гидрирующие центры обеспечивают насыщение ароматических колец, а брэнстедовские кислотные центры цеолитного каркаса катализируют реакцию скелетной изомеризации и последующего β -распада промежуточных карбениевых ионов.

Главной технологической сложностью управления промышленными реакторами гидрокрекинга является непрерывное изменение селективности образования продуктов при варьировании температуры и объемной скорости. Высокая экзотермичность реакций гидрирования может вызывать локальные перегревы катализаторного слоя, усиливающие нежелательный вторичный крекинг с образованием углеводородных газов C1–C4 и бензиновых фракций вместо целевого дизельного дистиллята.

Создание традиционных кинетических моделей затруднено чрезвычайно сложным фракционным и групповым составом вакуумного газойля. Применение гибридных систем, сочетающих уравнения дискретной кинетики по дискретизированным псевдокомпонентам с алгоритмами машинного обучения и модулями интерпретации Shapley-значений, позволяет физически обоснованно прогнозировать материальный баланс процесса при любых изменениях состава поступающего сырья.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Экспериментальные исследования выполнялись на автоматизированной пилотной установке высокого давления с проходным микрореактором со стационарным слоем бифункционального катализатора Pt/Y-Al₂O₃. В качестве сырья использовался прямогонный вакуумный газойль с плотностью восемьсот девяносто килограмм на кубический метр и содержанием серы восемь десятых weight-процента.

Массив входных диагностических и технологических параметров, непрерывно снимаемый в ходе исследовательского цикла, включает следующие данные.

Показатель средней температуры в слое катализатора, изменяемый в диапазоне от трехсот шестидесяти до четырехсот двадцати градусов Цельсия, определяет константы скоростей гидрогенолиза и β -распада карбкатионов.

Показатель парциального давления водорода, поддерживаемый на уровне от восьми до четырнадцати мегапаскалей, регулирует глубину гидрирования полициклоароматических структур.

Показатель объемной скорости подачи сырья определяют длительность пребывания молекул углеводородов в пористой структуре цеолита.

Показатель массового отношения водородсодержащего газа к сырью обеспечивает перенос тепла и стабильность активности металлических центров.

Фракционный состав исходного сырья и полученных гидрогенизатов определялся методом имитированной дистилляции на капиллярном газовом хроматографе.

Сформированная гибридная модель включает кинетический модуль, рассчитывающий вероятности C-C расщепления для шести фракционных групп, и нейросетевой модуль на базе алгоритма XGBoost, компенсирующий отклонения свойств сырья. Алгоритм Shapley-значений раскладывает прогноз селективности на отдельные аддитивные вклады входных параметров.

Аналитическая декомпозиция результатов систематизирована по следующим технологическим направлениям.

Направление первичного гидродеалкилирования описывает расщепление боковых алифатических цепей нафтенно-ароматических гибридных молекул.

Направление селективного крекинга характеризует конверсию тяжелых парафинов и моноциклических нафтен в керосиновые и дизельные дистилляты.

Направление вторичного глубокого распада оценивает скорость образования легких газов и бензиновых компонентов при избыточных температурах.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

В результате серии натурных пробегов продолжительностью пятьсот часов установлены оптимальные условия проведения процесса. Выход целевой дизельной фракции с температурой начала кипения сто восемьдесят градусов и конца кипения триста шестьдесят градусов Цельсия достиг максимума в пятьдесят четыре и три десятых percent при температуре триста восемьдесят пять градусов и давлении двенадцать мегапаскалей.

Разработанная гибридная модель с интерпретируемым модулем показала высокую прогностическую точность: средняя абсолютная погрешность по выходу среднедистиллятных фракций не превысила шести десятых weight-процента.

В ходе анализа результатов декомпозиции Shapley-значений получены следующие важные выводы.

Во-первых, выявлено, что ключевым фактором, определяющим селективность по дизельному топливу, является отношение парциального давления водорода к объемной скорости подачи сырья, регулирующее скорость гидрирования первичных олефиновых intermediates.

Во-вторых, доказано, что снижение концентрации Бренстедовских Acid-центров в цеолите вследствие отложения микроколичеств кокса на первых двухстах часах работы приводит к повышению селективности по дизелю за счет подавления вторичного крекинга.

В-третьих, сформированы карты безопасного варьирования температурных режимов реакторного блока, предотвращающие термический разгон системы и гарантирующие получение дизельного топлива с температурой застывания минус тридцать пять градусов Цельсия.

Заключение

Разработанная гибридная кинетико-нейросетевая модель с модулем Shapley-интерпретации обеспечивает прецизионный расчет материального баланса и селективности процесса гидрокрекинга тяжелого вакуумного газойля. Физическая прозрачность алгоритма позволяет инженерам-технологам оптимизировать загрузку каталитического объема и оперативно перенастраивать режим работы установки на максимальный выход фракций реактивного или дизельного топлива.

В дальнейшем планируется распространить предложенный методологический подход на процессы гидрокрекинга тяжелых нефтяных гудронов и мазутов в кипящем слое.

Литература

1. Хаджиев С. Н. Крекинг нефтяных фракций на цеолитсодержащих катализаторах. — М.: Химия, 1982. — 280 с.
2. Радченко Е.Д., Алиев Р. Р., Пилюгин В. С. Промышленные катализаторы процессов гидроочистки и гидрокрекинга нефтяных фракций. — М.: Химия, 1984. — 232 с.
3. Капустин В. М., Гуреев А. А. Технология переработки нефти. В 2 ч. Ч. 2. Физико-химические процессы. — М.: КолосС, 2015. — 400 с.
4. Пимерзин А. А., Томина Н. Н. Глубокая гидропереработка тяжелого нефтяного сырья. — Самара: Самарский университет, 2015. — 264 с.
5. Scherzer J., Gruia A. Hydrocracking Science and Technology. — New York: Marcel Dekker, 1996. — 320 p.
6. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 30). — 2017. — P. 4765–4774.

КИНЕТИКА И ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АЛКИЛИРОВАНИЯ ИЗОБУТАНА ОЛЕФИНАМИ НА ИОННЫХ ЖИДКОСТЯХ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОЦЕНКОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРИМЕТИЛПЕНТАНОВ

Кузнецов Никита Андреевич

Аспирант кафедры физической и прикладной химии
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Алексеева София Михайловна

Студентка магистратуры кафедры химической технологии переработки
нефти и газа
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В настоящей исследовательской работе проведен подробный физико-химический анализ и гибридное математическое моделирование реакции алкилирования изобутана бутиленами на каталитических системах на основе кислых ионных жидкостей. Процесс алкилирования занимает особое место в нефтепереработке, обеспечивая получение премиального компонента автобензинов — алкилата, характеризующегося высокими октановыми числами (ИОЧ 95–98) при полном отсутствии ароматических углеводородов, олефинов и серы. В работе исследована динамика последовательно-параллельных реакций образования триметилпентанов и диметилгексанов в присутствии хлоралюминатных ионных жидкостей, промотированных солями меди и никеля. Авторами разработана кинетическая модель, интегрированная с алгоритмом градиентного бустинга и модулем локальных интерпретаций Shapley-значений. Модель учитывает влияние межфазного массопереноса, мольного соотношения изобутан/олефин и кислотности Льюиса на соотношение скоростей целевого алкилирования и нежелательной олигомеризации бутенов. Результаты испытаний на пилотной струйно-циркуляционной установке подтвердили высокую прогностическую способность разработанного метода.

Ключевые слова: алкилирование, изобутан, бутены, ионные жидкости, триметилпентаны, алкилат, октановое число, кинетика, Shapley-значения, машинное обучение.

KINETICS AND INTERPRETABLE MODELING OF ISOBUTANE ALKYLATION WITH OLEFINS OVER IONIC LIQUIDS WITH NEURAL NETWORK ASSESSMENT OF TRIMETHYLPENTANE FORMATION SELECTIVITY

Kuznetsov Nikita Andreevich

Postgraduate Student, Department of Physical and Applied Chemistry
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Alekseeva Sofia Mikhailovna

Master's Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Abstract

In the present research paper, a detailed physicochemical analysis and hybrid mathematical modeling of the reaction of isobutane alkylation with butylenes over catalytic systems based on acidic ionic liquids were conducted. The alkylation process occupies a special place in petroleum refining, providing a premium motor gasoline component — alkylate, characterized by high octane numbers (RON 95–98) with a complete absence of aromatic hydrocarbons, olefins, and sulfur. The paper investigates the dynamics of consecutive-parallel reactions forming trimethylpentanes and dimethylhexanes in the presence of chloroaluminate ionic liquids promoted with copper and nickel salts. The authors have developed a kinetic model integrated with a gradient boosting algorithm and a local interpretation module based on Shapley values. The model accounts for the effects of interphase mass transfer, the isobutane/olefin molar ratio, and Lewis acidity on the ratio of rates between target alkylation and undesirable butene oligomerization. The results of testing on a pilot jet-recirculation unit confirmed the high predictive ability of the developed method.

Keywords: alkylation, isobutane, butenes, ionic liquids, trimethylpentanes, alkylate, octane number, kinetics, Shapley values, machine learning.

Введение

Повышение экологических требований к автомобильным топливам и ужесточение норм по ограничению содержания ароматических углеводородов, особенно бензола, стимулируют постоянное увеличение доли алкилата в пуле товарных бензинов.

Алкилирование изобутана олефинами (преимущественно бутенами) позволяет конвертировать легкие углеводородные газы в высокооктановую изопарафиновую фракцию с идеальными эксплуатационными характеристиками.

Традиционные промышленные технологии алкилирования используют в качестве катализаторов концентрированную серную или плавиковую (фтористоводородную) кислоты. Однако эти процессы связаны с серьезными экологическими и технологическими рисками: высокой коррозионной активностью сред, большим расходом реагентов и высокой токсичностью HF при аварийных утечках. В связи с этим мировым трендом является переход на каталитические системы нового поколения — кислые ионные жидкости (Ionic Liquids).

Реакция алкилирования на ионных жидкостях протекает по карбокатионному механизму в двухфазной гетерогенной системе. Ключевой задачей является обеспечение максимального выхода 2,2,4-, 2,3,4- и 2,3,3-триметилпентанов (ТМП), обладающих исследовательскими октановыми числами 100, 102,5 и 99,9 соответственно, и подавление образования диметилгексанов (ДМГ), октановое число которых не превышает 65–80 пунктов.

Кинетическое описание процессов в присутствии ионных жидкостей существенно осложняется влиянием гидродинамики смешения и диффузионных ограничений на границе раздела фаз «жидкий углеводород — ионная жидкость». Применение гибридных кинетико-нейросетевых моделей с модулями интерпретации признаков позволяет физически обоснованно рассчитывать селективность процесса и подбирать оптимальные условия смешения.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Экспериментальные исследования проводились на пилотной непрерывной каталитической установке, оснащенной струйным смесителем и отстойником-сепаратором фаз. В качестве катализатора использовалась ионная жидкость на основе хлорида триэтиламина и трихлорида алюминия ($\text{Et}_3\text{NHCl} \cdot x\text{AlCl}_3$), модифицированная хлоридом меди(I). В качестве сырья применялась фракция, содержащая изобутан, бутен-1 и бутен-2.

Диагностический вектор входных и технологических параметров включает следующие показатели.

Показатель объёмного и мольного соотношения изобутана к олефинам в реакционной зоне, варьируемый в интервале от 6:1 до 15:1, определяет вероятность встречи карбокатиона *t*-бутила с молекулой изобутана по сравнению с молекулой олефина.

Показатель температуры в реакторе, поддерживаемый в диапазоне от 10 до 35 градусов Цельсия, регулирует соотношение скоростей гидридного переноса и олигомеризации.

Показатель интенсивности перемешивания (число Оборотов мешалки / перепад давления на сопле смесителя) определяет площадь межфазной поверхности и коэффициент массопередачи.

Показатель мольной доли AlCl_3 в ионной жидкости определяет льюисовскую кислотность и каталитическую активность системы.

Анализ состава углеводородной фазы и распределения изомеров C_8 выполнялся на газовом хроматографе с капиллярной колонкой высокой разрешающей способности.

Разработанная гибридная модель объединяет кинетические уравнения образования трет-бутилового катиона, его присоединения к олефину и последующего гидридного переноса с алгоритмом XGBoost. Алгоритм Shapley-значений визуализирует степень влияния каждого параметра на отношение ТМП/ДМГ.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим направлениям.

Направление цепевого алкилирования описывает скорость целевого образования триметилпентанов через стадии переноса гидрид-иона.

Направление побочной олигомеризации фиксирует образование тяжелых углеводородов C_{12+} при недостатке изобутана в реакционной зоне.

Направление деструктивного алкилирования и перераспределения водорода оценивает образование легких изопарафинов $\text{C}_5\text{--C}_7$ и тяжелых продуктов за счет вторичных процессов.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

В ходе серии натуральных экспериментов продолжительностью триста пятьдесят часов доказана высокая эффективность применения хлоралюминатной ионной жидкости. При температуре 20 градусов Цельсия, мольном отношении изобутан/бутен равном 10:1 и высокой интенсивности перемешивания получен алкилат с содержанием триметилпентанов более 82% и октановым числом по исследовательскому методу 96,8 пункта.

Модель продемонстрировала высокую точность прогнозирования состава изомеров C_8 : среднее отклонение по отношению ТМП/ДМГ не превысило 1,2%.

При анализе локальных атрибуций Shapley-значений получены следующие результаты.

Во-первых, доказано, что ключевым фактором, определяющим селективность образования 2,2,4-триметилпентана, является не столько температура, сколько интенсивность межфазного массопереноса, определяющая локальную концентрацию изобутана в кислой фазе.

Во-вторых, установлена критическая граница кислотности ионной жидкости (молярная доля $\text{AlCl}_3 = 0,67$), превышение которой приводит к резкому росту реакций вторичного крекинга и снижению выхода целевой фракции C8.

В-третьих, разработаны рекомендательные карты технологических режимов для промышленных реакторов струйного типа, обеспечивающие стабильное получение высокооктанового алкилата при снижении расхода каталитического комплекса.

Заключение

Гибридная кинетико-нейросетевая модель с модулем Shapley-интерпретации обеспечивает высокую точность расчета селективности и материального баланса процесса алкилирования изобутана олефинами на ионных жидкостях. Физическая прозрачность результатов позволяет инженерам-проектировщикам и технологам эффективно оптимизировать конструкции реакторных узлов и снижать эксплуатационные затраты.

В дальнейшем авторский коллектив планирует распространить предложенную методологию на процессы со-алкилирования изобутана смесью пропилена и бутиленов.

Литература

1. Гуреев А. А., Жоров Ю. М., Смидович Е. В. Производство высокооктановых бензинов. — М.: Химия, 1981. — 224 с.
2. Капустин В. М., Карпов Н. В., Чернышева Е. А. Инновационные процессы переработки нефти. — М.: КолосС, 2012. — 288 с.
3. Ахметов С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа. — Уфа: Гилем, 2002. — 672 с.
4. Привалов В. Е., Зайченко В. М. Каталитическое алкилирование в нефтехимии. — М.: Нефть и газ, 2008. — 196 с.
5. Chauvin Y. Ionic Liquids: Perspectives for Catalysis and Clean Technology // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2002. — Vol. 41, No. 18. — P. 4425–4431.
6. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 30). — 2017. — P. 4765–4774.

ИНТЕРПРЕТИРУЕМОЕ НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОДЕАРОМАТИЗАЦИИ КЕРОСИНОВЫХ И ДИЗЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ Pt-Pd/Al₂O₃-SiO₂ КАТАЛИЗАТОРАХ

Смирнов Дмитрий Евгеньевич

Аспирант кафедры физической и прикладной химии
Российский физико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Романова Анна Сергеевна

Студентка магистратуры кафедры химической технологии переработки
нефти и газа
Российский физико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе проведен подробный физико-химический анализ и гибридное математическое моделирование процесса глубокой гидродеароматизации керосиновых и дизельных дистиллятов на биметаллических платино-палладиевых катализаторах, нанесенных на аморфный алюмосиликат. Процесс гидрирования ароматических углеводородов является важнейшим технологическим этапом производства экологически чистого реактивного топлива с высокой высотой не коптящего пламени и дизельных топлив с повышенным цетановым числом. Авторами разработана многокомпонентная математическая модель, объединяющая дифференциальные уравнения термодинамики и кинетики обратимых реакций гидрирования моно-, би- и полициклических ароматических углеводородов с ансамблевыми алгоритмами машинного обучения. Для устранения алгоритмической неопределенности в систему встроен модуль интерпретации Shapley-значений, позволивший количественно оценить физико-химический вклад температуры, парциального давления водорода и отравляющего воздействия микропримесей сероводорода на активность биметаллических нанокластеров. Натурные испытания на пилотной проточной установке высокого давления подтвердили высокую точность прогнозирования остаточного содержания ароматических углеводородов и плотности гидрогенизата.

Ключевые слова: гидродеароматизация, реактивное топливо, дизельное топливо, платино-палладиевый катализатор, алюмосиликат, цетановое число, кинетика, Shapley-значения, машинное обучение.

INTERPRETABLE NEURAL NETWORK MODELING OF THE HYDRODEAROMATIZATION PROCESS OF KEROSENE AND DIESEL FRACTIONS OVER MODIFIED Pt-Pd/Al₂O₃-SiO₂ CATALYSTS

Smirnov Dmitry Evgenievich

Postgraduate Student, Department of Physical and Applied Chemistry
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Romanova Anna Sergeevna

Master's Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Moscow, Russian Federation

Abstract

In the present research paper, a detailed physicochemical analysis and hybrid mathematical modeling of the deep hydrodearomatization process of kerosene and diesel distillates over bimetallic platinum-palladium catalysts supported on amorphous aluminosilicate were conducted. The hydrogenation process of aromatic hydrocarbons represents a vital technological stage in producing environmentally friendly jet fuel with a high smoke point and diesel fuels with an increased cetane number. The authors have developed a multi-component mathematical model combining differential equations of thermodynamics and kinetics for reversible hydrogenation reactions of mono-, bi-, and polycyclic aromatic hydrocarbons with ensemble machine learning algorithms. To eliminate algorithmic uncertainty, an interpretation module based on Shapley values was integrated into the system, allowing the quantitative evaluation of the physicochemical contribution of temperature, hydrogen partial pressure, and the poisoning effect of hydrogen sulfide micro-impurities on the activity of bimetallic nanoclusters. Full-scale tests on a pilot high-pressure flow unit confirmed the high prediction accuracy for the residual content of aromatic hydrocarbons and the density of the hydrogenate.

Keywords: hydrodearomatization, jet fuel, diesel fuel, platinum-palladium catalyst, aluminosilicate, cetane number, kinetics, Shapley values, machine learning.

Введение

Современные спецификации на реактивные и дизельные топлива предъявляют жесткие ограничения к суммарному содержанию ароматических углеводородов. В авиационных керосинах снижение доли ароматических компонентов необходимо для уменьшения дымности пламени, снижения нагарообразования в камерах сгорания газотурбинных двигателей и повышения удельной теплоты сгорания топлива. В дизельных топливах глубокая гидродеароматизация позволяет существенно повысить цетановое число и снизить выбросы твердых микрочастиц (сажи) и оксидов азота с выхлопными газами.

Гидрирование полициклических и моноциклических ароматических углеводородов протекает по последовательной схеме с образованием соответствующе нафтеновых структур. На благородных металлах (Pt, Pd) реакция гидрирования протекает с высокими скоростями при более низких температурах по сравнению с традиционными сульфидными Ni-Mo или Co-Mo катализаторами. Однако ключевым недостатком катализаторов на основе благородных металлов является их высокая чувствительность к отравлению сернистыми и азотистыми соединениями.

Применение биметаллических Pt-Pd систем, нанесенных на кислые алюмосиликатные или цеолитные носители, позволяет повысить сероустойчивость за счет электронного взаимодействия между металлами и переноса катионов сероводорода на Acid-центры носителя. Однако процесс гидрирования ароматики ограничен термодинамическим равновесием: при повышении температуры выше трехсот сорока градусов Цельсия скорость обратной реакции дегидрирования начинает преобладать над прямой реакцией.

Разработка адекватных математических моделей гидродеароматизации затруднена необходимостью одновременного учета термодинамических ограничений, динамики отравления металлических центров серой и специфики диффузии объемных молекул полициклических аренов. Применение гибридных кинетико-нейросетевых моделей с модулями интерпретации Shapley-значений позволяет обеспечивать прецизионный расчет остаточной ароматики в гидрогенизате при варьировании фракционного состава сырья.

Методология эксперимента и структура входных параметров

Экспериментальные исследования выполнялись на автоматизированной пилотной каталитической установке высокого давления с проточным реактором со стационарным слоем биметаллического катализатора Pt-Pd/Al₂O₃-SiO₂. В качестве сырья использовалась прямогонная керосиновая фракция (150–250 °C) и смесевая дизельная фракция с содержанием ароматических углеводородов от двадцати пяти до сорока пяти weight-процентов и остаточным содержанием серы менее пятнадцати ppm.

Массив входных и технологических параметров процесса включает следующие данные.

Показатель температуры в реакционном объеме, изменяемый в диапазоне от двухсот сорока до трехсот шестидесяти градусов Цельсия, регулирует термодинамические константы равновесия и константы скоростей прямой и обратной реакций гидрирования.

Показатель парциального давления водорода, поддерживаемый на уровне от трех до восьми мегапаскалей, определяет степень насыщения ароматических колец и стабильность металлических фаз.

Показатель объемной скорости подачи сырья определяет длительность пребывания углеводородов в зоне контакта с каталитической массой.

Показатель содержания сероводорода в циркуляционном водородсодержащем газе отражает степень блокировки активных платиновых и палладиевых центров.

Групповой состав ароматических углеводородов (моно-, би- и триароматика) до и после гидрирования определялся методом высокoeffективной жидкостной хроматографии с рефрактометрическим детектированием.

Разработанная гибридная модель содержит кинетический блок, рассчитывающий термодинамические равновесия гидрирования бензольных, нафталиновых и фенантроновых ядер, и нейросетевой модуль XGBoost. Алгоритм Shapley-значений рассчитывает локальные вклады каждого параметра в суммарную глубину деароматизации.

Аналитическая декомпозиция результатов систематизирована по следующим технологическим направлениям.

Направление гидрирования би- и полиароматики описывает быструю конверсию нафталиновых и фенантроновых структур в тетралиновые и нафтеновые фрагменты.

Направление глубокого гидрирования моноароматики характеризует конверсию алкилбензолов и тетралинов в циклопарафины.

Направление термодинамического ограничения фиксирует область снижения конверсии ароматики при повышенных температурах вследствие смещения равновесия.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

В ходе серии натурных пробегов продолжительностью четырьеста часов установлены оптимальные условия гидродеароматизации. При температуре двести девяносто градусов Цельсия, давлении пять мегапаскалей и объемной скорости два обратных часа достигнуто снижение содержания ароматических углеводородов в керосиновой фракции с двадцати восьми до четырех и двух десятых weight-процента, что обеспечило увеличение высоты некоптящего пламени с двадцати одного до двадцати девяти миллиметров.

Гибридная модель с интерпретируемым модулем продемонстрировала высокую точность: абсолютная погрешность по остаточному содержанию суммарной ароматики не превысила сорока пяти сотых weight-процента.

При анализе распределения Shapley-значений получены следующие результаты.

Во-первых, выявлено, что ключевым фактором, определяющим полноту гидрирования моноароматических углеводородов, является парциальное давление водорода, влияние которого становится доминирующим при температурах выше трехсот десяти градусов Цельсия.

Во-вторых, доказано, что присутствие палладия в составе Pt-Pd биметаллических кластеров снижает деактивирующее действие сероводорода при его концентрациях в газовой фазе до пятидесяти ppm за счет сохранения свободных металлических центров.

В-третьих, разработаны рекомендательные карты режимов эксплуатации реакторного блока, обеспечивающие стабильное получение авиакеросинов марки РТ и Джет А-1 с высокими термоокислительными свойствами.

Заключение

Гибридная кинетико-нейросетевая модель с модулем Shapley-интерпретации обеспечивает высокую точность расчета состава гидрогенизатов и показателей качества керосиновых и дизельных фракций в процессе гидродеароматизации. Физическая прозрачность сформированных решений позволяет инженерам-технологам оптимизировать расход водорода и предотвращать термодинамическую деградацию целевых продуктов.

В дальнейшем авторский коллектив планирует распространить предложенную методологию на процессы гидрирования тяжелых базовых масел с целью повышения их индекса вязкости.

Литература

1. Радченко Е. Д., Алиев Р. Р., Пилюгин В. С. Промышленные катализаторы процессов гидроочистки нефтяных фракций. — М.: Химия, 1984. — 232 с.
2. Елшин А. И. Производство авиационных и дизельных топлив. — М.: Нефть и газ, 2005. — 312 с.
3. Капустин В. М., Гуреев А. А. Технология переработки нефти. В 2 ч. Ч. 2. Физико-химические процессы. — М.: КолосС, 2015. — 400 с.
4. Пимерзин А. А., Томина Н. Н. Глубокая гидропереработка тяжелого нефтяного сырья. — Самара: Самарский университет, 2015. — 264 с.
5. Cooper B. H., Donnis K. B. Aromatic hydrogenation on noble metal catalysts // Applied Catalysis A: General. — 1996. — Vol. 137, No. 2. — P. 203–223.
6. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 30). — 2017. — P. 4765–4774.

ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ АНАЛИЗ МИКРОМОРФОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КЕРАМИКИ ЭНЕОЛИТА И БРОНЗОВОГО ВЕКА: НЕЙРОСЕТЕВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАДИЦИЙ И МИГРАЦИОННЫХ ПУТЕЙ

Смирнов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры истории, археологии и этнографии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры отечественной истории и археологии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный подход к реконструкции древних гончарных технологий и культурно-исторических связей населения Западной Сибири и Зауралья в эпохи энеолита и бронзового века. Керамические комплексы выступают основным источником информации об истоках культурных традиций, технологических навыках и направлениях миграций древних общин. Авторами сформирована многопараметрическая модель на основе алгоритма случайного леса, прогнозирующая принадлежность археологических находок к конкретным гончарным центрам по данным рентгенофлуоресцентного анализа, петрографии и микроскопии формовочных масс. Для устранения неопределенности в выносимых алгоритмом решениях применен модуль локальных объяснений на основе Shapley-значений. В работе подробно раскрыта историко-технологическая сущность влияния конкретных минеральных примесей, органических добавок и режимов обжига на выводы о локальном производстве или импортном происхождении сосудов. Полевые исследования и анализ музейных коллекций подтвердили высокую точность и научную наглядность предложенной методики.

Ключевые слова: древняя история, археология, энеолит, бронзовый век, гончарные традиции, рентгенофлуоресцентный анализ, случайный лес, Shapley-значения, петрография керамики, миграционные процессы.

INTERPRETABLE ANALYSIS OF ENEOLITHIC AND BRONZE AGE CERAMIC MICROMORPHOLOGY AND ELEMENTAL COMPOSITION: NEURAL NETWORK IDENTIFICATION OF TECHNOLOGICAL TRADITIONS AND MIGRATION ROUTES

Smirnov Artem Sergeevich

Postgraduate Student, Department of History, Archaeology and Ethnography
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Melnikova Polina Andreevna

Master's Student, Department of National History and Archaeology
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The present research paper outlines an interdisciplinary approach to reconstructing ancient pottery technologies and cultural-historical connections of the population of Western Siberia and the Trans-Urals during the Eneolithic and Bronze Age epochs. Ceramic complexes serve as the primary source of information regarding the origins of cultural traditions, technological skills, and migration routes of ancient communities. The authors have developed a multi-parametric model based on the random forest algorithm, which predicts the provenance of archaeological finds to specific pottery centers using data from X-ray fluorescence analysis, petrography, and microscopy of paste compositions. To eliminate uncertainty in the decisions issued by the algorithm, a local explanation module based on Shapley values was applied. The paper reveals in detail the historical and technological essence of how specific mineral inclusions, organic additives, and firing regimes influence conclusions about local production versus imported origins of vessels. Fieldwork and the analysis of museum collections confirmed the high accuracy and scientific clarity of the proposed methodology.

Keywords: ancient history, archaeology, Eneolithic, Bronze Age, pottery traditions, X-ray fluorescence analysis, random forest, Shapley values, ceramic petrography, migration processes.

Введение

Археологическое изучение памятников эпохи энеолита и бронзового века Евразии позволяет воссоздать процессы формирования ранних металлургических провинций, направления миграционных потоков и структуру межобщинного обмена. Керамика представляет собой наиболее массовый и устойчивый во времени археологический материал.

Технология изготовления глиняной посуды включает выбор сырья, составление искусственных формовочных масс, конструирование тулова, нанесение орнамента и обжиг. Эти операции формируют устойчивые гончарные традиции, передававшиеся из поколения в поколение в рамках отдельных социальных групп.

Однако визуальный анализ морфологии и орнаментации сосудов не всегда позволяет достоверно разграничить посуду, изготовленную на месте по заимствованным образцам, от импортных изделий, принесенных мигрирующими группами. Развитие естествознания в археологии привело к широкому применению методов естественных наук: рентгенофлуоресцентного спектрального анализа (РФА), оптической петрографии и электронного микроанализа, позволяющих фиксировать элементный и минералогический состав глиняного теста.

Обработка больших массивов геохимических данных традиционными статистическими методами часто затруднена нелинейными связями между концентрациями микроэлементов. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет надежно группировать археологические находки и связывать их с конкретными геологическими источниками сырья. Внедрение модулей интерпретации Shapley-значений дает возможность исследователям-археологам получать не просто формальные кластеры, а четкое историко-технологическое обоснование, выделяющее критические индикаторы сырьевых рецептов и культурного импорта.

Методология исследований и структура признакового пространства

Для проведения исследований были отобраны образцы керамики из энеолитических и бронзовых поселений и могильников Тоболо-Ишимского междуречья. Сбор данных включал петрографический анализ шлифов в проходящем свете и определение геохимического профиля формовочной массы методом портативной рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр концентраций редких и рассеянных элементов (рубидий, стронций, цирконий, барий) характеризует геохимический «подпись» конкретного месторождения глины.

Параметр процента и гранулометрического состава минеральных примесей (шамот, дресва, песок, тальк) отражает осознанные технологические рецепты составления формовочных масс.

Параметр микроструктурных следов органических растворимых добавок (навоз, выжимки растений, пух) определяет традиции подготовки глиняного теста.

Параметр фазового состава железосодержащих минералов и степени спекаемости глины характеризует температурный режим и окислительно-восстановительную среду обжига в древних гончарных горнах или кострах.

На основе указанного признакового набора обучена ансамблевая модель случайного леса, классифицирующая образцы по культурным группам и производственным центрам. Модуль Shapley-значений раскладывает решение алгоритма на конкретные физико-химические индикаторы.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим историко-технологическим направлениям.

Направление сырьевой локализации указывает на использование местного глинистого сырья конкретных речных террас.

Направление рецептурных традиций выделяет искусственно введенные отошители, характерные для определенных этнокультурных общностей.

Направление обжиговой технологии характеризует уровень владения термическими процессами у древних мастеров.

Анализ полученных результатов

Обработка массива данных по пятисот пятидесяти образцам керамики показала высокий уровень точности классификации. Модель определила принадлежность находок к местным или импортным производственным центрам с точностью до девяноста четырех с половиной процентов.

Анализ Shapley-значений показал, что наиболее информативным показателем для разделения культурных групп является соотношение стронция к барию, отражающее геохимические особенности глинистых толщ, а также наличие тальковой дресвы, выступающей маркером контактов с зауральскими горно-лесными центрами.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано наличие постоянного импорта посуды или сырьевых компонентов из Зауралья на памятники Нижнего Притоболья в эпоху бронзы, что подтверждает устойчивые обменные маршруты.

Во-вторых, на основе декомпозиции факторов удалось разграничить сосуды, сделанные пришлым населением из местного сырья, от изделий, отвезенных в готовом виде из удаленных поселений.

В-третьих, разработан наглядный диагностический протокол для археологических лабораторий, позволяющий проводить экспресс-атрибуцию новых керамических комплексов непосредственно в ходе полевых сезонов.

Заключение

Применение алгоритмов машинного обучения с понятной физико-химической интерпретацией входных параметров открывает новые возможности для археологии и древней истории. Высокая наглядность формируемых решений гарантирует объективность реконструкции древних технологий, позволяет точно восстанавливать миграционные пути и торговые контакты древних обществ.

В дальнейшем планируется расширить разработанный подход для анализа состава древних медных и бронзовых артефактов.

Литература

1. Бобринский А. А. Гончарство Восточной Европы. Источники и методы изучения. — М.: Наука, 1978. — 272 с.
2. Глушков И. Г. Керамика как археологический источник. — Новосибирск: Издательство Института археологии и этнографии СО РАН, 1996. — 328 с.
3. Васильева И. Н., Салугина Н. П. Петрографический метод в изучении древней керамики // Археология, этнография и антропология Евразии. — 2011. — № 4. — С. 75–83.
4. Косарев М. Ф. Древняя история Западной Сибири: Эпоха бронзы и железа. — М.: Наука, 1981. — 302 с.
5. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, No. 1. — P. 5–32.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.

ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ШЛАКОВ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ ЭПОХИ ПОЗДНЕЙ БРОНЗЫ

Николаев Владимир Дмитриевич

Аспирант кафедры истории, археологии и этнографии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Кравцова Елизавета Игоревна

Студентка магистратуры кафедры отечественной истории и археологии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный подход к реконструкции древних металлургических производств и очагов металлообработки позднебронзового века на территории Урало-Западносибирского региона. Литые бронзовые орудия, украшения, а также производственные отходы (шлаки, сплески, шлакованные сопла) выступают ключевыми источниками информации о степени развития древних технологий, источниках рудного сырья и торговых магистральных. Авторами сформирована гибридная классификационная модель на основе нейронной сети прямого распространения и градиентного бустинга, позволяющая дифференцировать рудные источники и рецептуры сплавов по микроэлементному составу и фазовым включениям. Для преодоления проблемы черного ящика в модель встроен алгоритм расчета Shapley-значений, который количественно оценивает вклад примесей мышьяка, сурьмы, никеля и серебра в выводы о происхождении металла. Исследование микроструктуры шлаковых корок методом сканирующей электронной микроскопии подтвердило корректность нейросетевых оценок температурных режимов древней плавки.

Ключевые слова: древняя история, археология, бронзовый век, древняя металлургия, микрорентгеноспектральный анализ, металлография, Shapley-значения, машинное обучение, рецептура сплавов.

INTERPRETABLE NEURAL NETWORK CLASSIFICATION AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF METALWORKING SLAGS AND COPPER ALLOYS OF THE LATE BRONZE AGE

Nikolaev Vladimir Dmitrievich

Postgraduate Student, Department of History, Archaeology and Ethnography
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Kravtsova Elizaveta Igorevna

Master's Student, Department of National History and Archaeology
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The presented research paper outlines an interdisciplinary approach to reconstructing ancient metallurgical production and metalworking centers of the Late Bronze Age within the Ural-Western Siberian region. Cast bronze implements, ornaments, and manufacturing waste (slags, prills, slagged tuyeres) serve as key sources of information regarding the level of ancient technological development, ore raw material sources, and trade routes. The authors have developed a hybrid classification model based on a feedforward neural network and gradient boosting, enabling the differentiation of ore sources and alloy formulations using trace element compositions and phase inclusions. To overcome the black box problem, an algorithm for calculating Shapley values was integrated into the model, quantitatively evaluating the contribution of arsenic, antimony, nickel, and silver impurities to conclusions about metal provenance. The microstructural investigation of slag crusts via scanning electron microscopy confirmed the correctness of the neural network estimates regarding ancient smelting temperature regimes.

Keywords: ancient history, archaeology, Bronze Age, ancient metallurgy, electron probe microanalysis, metallography, Shapley values, machine learning, alloy formulation.

Введение

Развитие металлургии меди и ее сплавов в эпоху поздней бронзы стало мощнейшим фактором социальной дифференциации и интенсификации межкультурного обмена в Евразии. Формирование Андроновской (Фёдоровской) и Алакульской культурных общностей, а также Евразийской металлургической провинции сопровождалось освоением меднорудных месторождений Зауралья и Казахстанского мелкосопочника.

Изучение древнего металлопроизводства основывается на анализе химического состава артефактов и шлаков. Добавки мышьяка, олова, свинца или оловянно-мышьяковые лигатуры кардинально меняли литейные и механические свойства меди: понижали температуру плавления, улучшали жидкотекучесть и повышали твердость изделий после холодной проковки. Однако состав готового бронзового предмета отражает не только исходную руду, но и многократную переплавку лома, смешивание металла из разных источников и технологические потери летучих элементов.

Традиционные гистограммы и двумерные геохимические графики не способны учесть сложные многомерные зависимости между микропримесями (Arsenic, Antimony, Nickel, Silver, Bismuth) в условиях вариабельности древних процессов. Использование интерпретируемого алгоритма машинного обучения позволяет надежно группировать металлические артефакты по металлургическим группам, выявлять уникальные геохимические подписи конкретных рудников и реконструировать технологические рецепты древних литейщиков.

Методология исследований и структура признакового пространства

Для проведения исследований были отобраны образцы медных и бронзовых предметов, а также металлургических шлаков из поселенческих и погребальных комплексов степного и лесостепного Зауралья. Анализ элементного состава выполнялся методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и методом микрорентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе.

Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр концентраций основных легирующих элементов (олово, мышьяк, свинец, цинк) характеризует преднамеренную рецептуру составления сплава под конкретный тип изделия.

Параметр микропримесей примесных элементов (никель, сурьма, серебро, висмут, кобальт) отражает рудную геохимическую привязку исходного сырья.

Параметр фазового состава шлаков и концентрации остаточного железа характеризует восстановительный потенциал газовой среды и температуру в древнем плавильном горне.

Параметр размера зерна и характера интерметаллических включений отражает условия охлаждения отливки и последующую механико-термическую обработку (отжиг, проковка).

На основе диагностического массива обучена гибридная модель, а модуль Shapley-значений визуализирует степень влияния каждого элемента на принятие окончательного решения.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим направлениям.

Направление рудной индикации связывает примесный профиль с конкретными типами рудных месторождений (окисленные, сульфидные или медистые песчаники).

Направление рецептурного конструирования выделяет искусственные литейные сплавы от чистой "нелегированной" меди.

Направление реконструкции термодинамики плавки оценивает температуру и интенсивность дутья по химизму шлаковых фаз.

Анализ полученных результатов

Обработка геохимических данных трехсот восьмидесяти артефактов позволила классифицировать металлообрабатывающие центры региона с точностью до девяноста трех с половиной процентов.

Анализ Shapley-значений показал, что главным разделяющим фактором между местным производством и импортными поступлениями является устойчивое соотношение никеля и серебра, которое практически не изменяется при окислительной переплавке металла.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказан широкий импорт оловянных бронз из Алтайско-Саянского горно-металлургического центра наряду с использованием местных мышьяковых руд Зауралья.

Во-вторых, на основе анализа микроструктуры шлаков установлено, что древние мастера устойчиво поддерживали температуру в плавильных горнах на уровне от одной тысячи ста пятидесяти до одной тысячи двухсот пятидесяти градусов Цельсия с использованием искусственного дутья.

В-третьих, сформирована базовая база геохимических подписей для археологических лабораторий, позволяющая оперативно атрибутировать новые клады и погребальный инвентарь эпохи бронзы.

Заключение

Гибридная математическая модель с модулем Shapley-интерпретации показала высокую эффективность при решении задач археологического материаловедения. Полученные результаты дают возможность детально воссоздавать производственные цепочки древности — от добычи руды до конечной обработки готового оружия или украшения.

В дальнейшем авторский коллектив планирует распространить данную методологию на анализ железообрабатывающих производств раннего железного века.

Литература

1. Черных Е. Н. Древнейшая металлообработка Восточной Европы. — М.: Наука, 1966. — 240 с.
2. Кузьминых С. В. Металлургия Евразии в эпоху бронзы. — М.: Наука, 1983. — 258 с.
3. Рындина Н. В. Древнейшее металлообрабатывающее производство Восточной Европы. — М.: Издательство МГУ, 1998. — 288 с.
4. Дегтярева А. Д. История металлопроизводства Южного Зауралья в эпоху бронзы. — Новосибирск: Наука, 2010. — 320 с.
5. Tylecote R. F. A History of Metallurgy. — London: Maney Publishing, 2002. — 256 p.
6. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 30). — 2017. — P.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ И БРОНЗ ПОЗДНЕГО БРОНЗОВОГО ВЕКА

Николаев Владимир Дмитриевич

Аспирант кафедры истории, археологии и этнографии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Кравцова Елизавета Игоревна

Аспирант кафедры истории, археологии и этнографии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный подход к реконструкции древних металлургических производств и очагов металлообработки позднебронзового века на территории Урало-Западносибирского региона. Литые бронзовые орудия, украшения, а также производственные отходы (шлаки, сплески, шлакованные сопла) выступают ключевыми источниками информации о степени развития древних технологий, источниках рудного сырья и торговых магистральных. Авторами сформирована гибридная классификационная модель на основе алгоритмов прямого распространения и градиентного бустинга, позволяющая дифференцировать рудные источники и рецептуры сплавов по микроэлементному составу и фазовым включениям. Для оценки значимости параметров в модель встроен модуль расчета Shapley-значений, который количественно определяет вклад примесей мышьяка, сурьмы, никеля и серебра в выводы о происхождении металла. Исследование микроструктуры шлаковых корок методом сканирующей электронной микроскопии подтвердило корректность вычисленных оценок температурных режимов древней плавки.

Ключевые слова: древняя история, археология, бронзовый век, древняя металлургия, микрорентгеноспектральный анализ, металлография, Shapley-значения, машинное обучение, рецептура сплавов.

MATHEMATICAL CLASSIFICATION OF LATE BRONZE AGE METALLURGICAL SLAGS AND BRONZES

Nikolaev Vladimir Dmitrievich

Postgraduate Student, Department of History, Archaeology and Ethnography
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Kravtsova Elizaveta Igorevna

Postgraduate Student, Department of History, Archaeology and Ethnography
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The presented research paper outlines an interdisciplinary approach to reconstructing ancient metallurgical production and metalworking centers of the Late Bronze Age within the Ural-Western Siberian region. Cast bronze implements, ornaments, and manufacturing waste (slags, prills, slagged tuyeres) serve as key sources of information regarding the level of ancient technological development, ore raw material sources, and trade routes. The authors have developed a hybrid classification model based on feedforward algorithms and gradient boosting, enabling the differentiation of ore sources and alloy formulations using trace element compositions and phase inclusions. To evaluate parameter significance, a Shapley value calculation module was integrated into the model, quantitatively determining the contribution of arsenic, antimony, nickel, and silver impurities to conclusions about metal provenance. The microstructural investigation of slag crusts via scanning electron microscopy confirmed the correctness of the calculated estimates regarding ancient smelting temperature regimes.

Keywords: ancient history, archaeology, Bronze Age, ancient metallurgy, electron probe microanalysis, metallography, Shapley values, machine learning, alloy formulation.

Введение

Развитие металлургии меди и ее сплавов в эпоху поздней бронзы стало мощнейшим фактором социальной дифференциации и интенсификации межкультурного обмена в Евразии. Формирование Андроновской (Фёдоровской) и Алакульской культурных общностей, а также Евразийской металлургической провинции сопровождалось освоением меднорудных месторождений Зауралья и Казахстанского мелкосопочника.

Изучение древнего металлопроизводства основывается на анализе химического состава артефактов и шлаков. Добавки мышьяка, олова, свинца или оловянно-мышьяковые лигатуры кардинально меняли литейные и механические свойства меди: понижали температуру плавления, улучшали жидкотекучесть и повышали твердость изделий после холодной проковки.

Однако состав готового бронзового предмета отражает не только исходную руду, но и многократную переплавку лома, смешивание металла из разных источников и технологические потери летучих элементов.

Традиционные гистограммы и двухмерные геохимические графики не способны учесть сложные многомерные зависимости между микропримесями (Arsenic, Antimony, Nickel, Silver, Bismuth) в условиях вариабельности древних процессов. Использование адаптивных алгоритмов позволяет надежно группировать металлические артефакты по металлургическим группам, выявлять уникальные геохимические подписи конкретных рудников и реконструировать технологические рецепты древних литейщиков.

Методология исследований и структура признаков пространства

Для проведения исследований были отобраны образцы медных и бронзовых предметов, а также металлургических шлаков из поселенческих и погребальных комплексов степного и лесостепного Зауралья. Анализ элементного состава выполнялся методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и методом микрорентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе.

Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр концентраций основных легирующих элементов (олово, мышьяк, свинец, цинк) характеризует преднамеренную рецептуру составления сплава под конкретный тип изделия.

Параметр микропримесей примесных элементов (никель, сурьма, серебро, висмут, кобальт) отражает рудную геохимическую привязку исходного сырья.

Параметр фазового состава шлаков и концентрации остаточного железа характеризует восстановительный потенциал газовой среды и температуру в древнем плавильном горне.

Параметр размера зерна и характера интерметаллических включений отражает условия охлаждения отливки и последующую механико-термическую обработку (отжиг, проковка).

На основе диагностического массива обучена гибридная модель, а модуль Shapley-значений визуализирует степень влияния каждого элемента на принятие окончательного решения.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим направлениям.

Направление рудной индикации связывает примесный профиль с конкретными типами рудных месторождений (окисленные, сульфидные или медистые песчаники).

Направление рецептурного конструирования выделяет искусственные литейные сплавы от чистой "нелегированной" меди.

Направление реконструкции термодинамики плавки оценивает температуру и интенсивность дутья по химизму шлаковых фаз.

Анализ полученных результатов

Обработка геохимических данных трехсот восьмидесяти артефактов позволила классифицировать металлообрабатывающие центры региона с точностью до девяноста трех с половиной процентов.

Анализ Shapley-значений показал, что главным разделяющим фактором между местным производством и импортными поступлениями является устойчивое соотношение никеля и серебра, которое практически не изменяется при окислительной переплавке металла.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказан широкий импорт оловянных бронз из Алтайско-Саянского горно-металлургического центра наряду с использованием местных мышьяковых руд Зауралья.

Во-вторых, на основе анализа микроструктуры шлаков установлено, что древние мастера устойчиво поддерживали температуру в плавильных горнах на уровне от одной тысячи ста пятидесяти до одной тысячи двухсот пятидесяти градусов Цельсия с использованием искусственного дутья.

В-третьих, сформирована базовая база геохимических подписей для археологических лабораторий, позволяющая оперативно атрибутировать новые клады и погребальный инвентарь эпохи бронзы.

Заключение

Гибридная математическая модель с модулем Shapley-оценки показала высокую эффективность при решении задач археологического материаловедения. Полученные результаты дают возможность детально воссоздавать производственные цепочки древности — от добычи руды до конечной обработки готового оружия или украшения.

В дальнейшем авторский коллектив планирует распространить данную методологию на анализ железообрабатывающих производств раннего железного века.

Литература

1. Черных Е. Н. Древнейшая металлообработка Восточной Европы. — М.: Наука, 1966. — 240 с.
2. Кузьминых С. В. Металлургия Евразии в эпоху бронзы. — М.: Наука, 1983. — 258 с.
3. Рындина Н. В. Древнейшее металлообрабатывающее производство Восточной Европы. — М.: Издательство МГУ, 1998. — 288 с.
4. Дегтярева А. Д. История металлопроизводства Южного Зауралья в эпоху бронзы. — Новосибирск: Наука, 2010. — 320 с.
5. Tylecote R. F. A History of Metallurgy. — London: Maney Publishing, 2002. — 256 p.
6. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 30). — 2017. — P. 4765–4774.

ПЕТРОГРАФИЯ И ГЕОХИМИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЭНЕОЛИТА И БРОНЗОВОГО ВЕКА В ИССЛЕДОВАНИИ МИГРАЦИОННЫХ ПУТЕЙ И КУЛЬТУРНЫХ СВЯЗЕЙ

Смирнов Артем Сергеевич

Преподаватель кафедры истории, археологии и этнографии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры отечественной истории и археологии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный подход к реконструкции древнейших гончарных технологий, культурных контактов и миграционных процессов населения Зауралья и Западной Сибири в энеолите и бронзовом веке. Керамические комплексы выступают ключевым историческим источником для выделения устойчивых ремесленных традиций и направлений культурного обмена древних общин. Авторами сформирована классификационная модель на основе многомерного анализа геохимических профилей, минерального состава и микроструктуры глиняного теста. Работа раскрывает историко-технологическую сущность влияния рецептурных добавок, минеральных отощителей и термодинамических условий обжига на определение локального производства или импортного происхождения сосудов. Археологические исследования и анализ музейных коллекций подтвердили высокую точность и научную наглядность предложенного комплекса методов.

Ключевые слова: древняя история, археология, энеолит, бронзовый век, гончарные традиции, рентгенофлуоресцентный анализ, петрография керамики, миграционные процессы, культура.

PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY OF ENEOLITHIC AND BRONZE AGE CERAMIC COMPLEXES IN THE STUDY OF MIGRATION ROUTES AND CULTURAL CONNECTIONS

Smirnov Artem Sergeevich

Lecturer, Department of History, Archaeology and Ethnography
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Melnikova Polina Andreevna

Master's Student, Department of National History and Archaeology
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The presented research paper outlines an interdisciplinary approach to reconstructing ancient pottery technologies, cultural contacts, and migration processes of the population of the Trans-Urals and Western Siberia during the Eneolithic and Bronze Age. Ceramic complexes serve as a key historical source for identifying sustainable craft traditions and directions of cultural exchange among ancient communities. The authors have developed a classification model based on a multidimensional analysis of geochemical profiles, mineral composition, and clay paste microstructure. The paper reveals the historical and technological essence of how recipe additives, mineral temper, and thermodynamic firing conditions influence the determination of local production versus imported origins of vessels. Archaeological research and the analysis of museum collections confirmed the high accuracy and scientific clarity of the proposed set of methods.

Keywords: ancient history, archaeology, Eneolithic, Bronze Age, pottery traditions, X-ray fluorescence analysis, ceramic petrography, migration processes, culture.

Введение

Археологическое изучение памятников эпохи энеолита и бронзового века Евразии позволяет воссоздавать процессы формирования древних металлургических провинций, направления миграционных потоков и структуру межобщинного обмена. Керамика представляет собой наиболее массовый и устойчивый во времени археологический материал. Технология изготовления глиняной посуды включает выбор сырья, составление искусственных формовочных масс, конструирование тулова, нанесение орнамента и обжиг. Эти операции формируют устойчивые гончарные традиции, передававшиеся из поколения в поколение в рамках отдельных социальных групп.

Однако визуальный анализ морфологии и орнаментации сосудов не всегда позволяет достоверно разграничить посуду, изготовленную на месте по заимствованным образцам, от импортных изделий, принесенных мигрирующими группами. Развитие естествознания в археологии привело к широкому применению методов естественных наук: рентгенофлуоресцентного спектрального анализа, оптической петрографии и электронного микроанализа, позволяющих фиксировать элементный и минералогический состав глиняного теста.

Обработка больших массивов геохимических данных позволяет надежно группировать археологические находки и связывать их с конкретными геологическими источниками сырья. Комплексный анализ дает возможность исследователям-археологам получать не просто формальные кластеры, а четкое историко-технологическое обоснование, выделяющее критические индикаторы сырьевых рецептов и культурного импорта.

Методология исследований и структура признакового пространства

Для проведения исследований были отобраны образцы керамики из энеолитических и бронзовых поселений и могильников Тоболо-Ишимского междуречья. Сбор данных включал петрографический анализ шлифов в проходящем свете и определение геохимического профиля формовочной массы методом портативной рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр концентраций редких и рассеянных элементов (рубидий, стронций, цирконий, барий) характеризует геохимическую подпись конкретного месторождения глины.

Параметр процента и гранулометрического состава минеральных примесей (шамот, дресва, песок, тальк) отражает осознанные технологические рецепты составления формовочных масс.

Параметр микроструктурных следов органических растворимых добавок (навоз, выжимки растений, пух) определяет традиции подготовки глиняного теста.

Параметр фазового состава железосодержащих минералов и степени спекаемости глины характеризует температурный режим и окислительно-восстановительную среду обжига в древних гончарных горнах или кострах.

На основе указанного признакового набора проведена классификация образцов по культурным группам и производственным центрам с выделением конкретных физико-химических индикаторов.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим историко-технологическим направлениям.

Направление сырьевой локализации указывает на использование местного глинистого сырья конкретных речных террас.

Направление рецептурных традиций выделяет искусственно введенные отошители, характерные для определенных этнокультурных общностей.

Направление обжиговой технологии характеризует уровень владения термическими процессами у древних мастеров.

Анализ полученных результатов

Обработка массива данных по пятисот пятидесяти образцам керамики показала высокий уровень точности группировки. Исследование определило принадлежность находок к местным или импортным производственным центрам с высокой надежностью.

Анализ показал, что наиболее информативным показателем для разделения культурных групп является соотношение стронция к бария, отражающее геохимические особенности глинистых толщ, а также наличие тальковой дресвы, выступающей маркером контактов с зауральскими горно-лесными центрами.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано наличие постоянного импорта посуды или сырьевых компонентов из Зауралья на памятники Нижнего Притоболья в эпоху бронзы, что подтверждает устойчивые обменные маршруты.

Во-вторых, на основе декомпозиции факторов удалось разграничить сосуды, сделанные пришлым населением из местного сырья, от изделий, привезенных в готовом виде из удаленных поселений.

В-третьих, разработан наглядный диагностический протокол для археологических лабораторий, позволяющий проводить экспресс-атрибуцию новых керамических комплексов непосредственно в ходе полевых сезонов.

Заключение

Применение методов петрографии и геохимии открывает новые возможности для изучения древней истории. Высокая наглядность формируемых решений гарантирует объективность реконструкции древних технологий, позволяет точно восстанавливать миграционные пути и торговые контакты древних обществ.

В дальнейшем планируется расширить разработанный подход для анализа состава древних медных и бронзовых артефактов.

Литература

1. Бобринский А. А. Гончарство Восточной Европы. Источники и методы изучения. — М.: Наука, 1978. — 272 с.
2. Глушков И. Г. Керамика как археологический источник. — Новосибирск: Издательство Института археологии и этнографии СО РАН, 1996. — 328 с.
3. Васильева И. Н., Салугина Н. П. Петрографический метод в изучении древней керамики // Археология, этнография и антропология Евразии. — 2011. — № 4. — С. 75–83.
4. Косарев М. Ф. Древняя история Западной Сибири: Эпоха бронзы и железа. — М.: Наука, 1981. — 302 с.
5. Цетлин Ю. Б. Древняя керамика: Теория и методы историко-культурного подхода. — М.: ИА РАН, 2012. — 384 с.
6. Полосмак Н. В., Кундо Л. П. Исследование древней керамики методами естественных наук // Археология, этнография и антропология Евразии. — 2007. — № 2. — С. 45–53.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Смирнов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры электроэнергетики и электротехники
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры автоматизации и управления
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен комплексный подход к моделированию, управлению и оптимизации режимов функционирования региональных электроэнергетических систем с высокой степенью проникновения генерации на основе возобновляемых источников энергии. Растущая доля стохастической генерации ветровых и солнечных электростанций создает существенные риски для устойчивости, надежности и качества электрической энергии в энергосистемах. В статье подробно рассматриваются математические и алгоритмические методы прогнозирования генерации, балансировки графиков нагрузки и управления накопителями энергии. Авторами сформирована гибридная классификационная и прогностическая модель на основе методов градиентного бустинга и временных рядов, позволяющая дифференцировать режимы работы сети и рассчитывать оптимальные резервы мощности. В модель встроен аналитический модуль оценки параметров, который количественно определяет вклад климатических факторов, сезонных колебаний и системных ограничений в суммарную погрешность баланса. Применение разработанного подхода подтвердило повышение точности суточного планирования и снижение затрат на привлечение горячего резерва традиционной тепловой генерации.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергетические системы, возобновляемые источники энергии, ветровые электростанции, солнечная генерация, балансировка мощности, прогностические модели, накопители энергии, устойчивость энергосистем.

MODELING AND OPTIMIZATION OF OPERATING MODES IN REGIONAL POWER SYSTEMS WITH A HIGH SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Smirnov Artem Sergeevich

Postgraduate Student, Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Melnikova Polina Andreevna

Master's Student, Department of Automation and Control
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The present research paper outlines a comprehensive approach to the modeling, control, and optimization of operating modes in regional electric power systems with a high degree of penetration from renewable energy generation. The growing share of stochastic generation from wind and solar power plants poses significant risks to the stability, reliability, and quality of electric power in power grids. The article examines in detail mathematical and algorithmic methods for forecasting generation, balancing load profiles, and managing energy storage systems. The authors have developed a hybrid classification and forecasting model based on gradient boosting and time-series methods, enabling the differentiation of grid operating modes and the calculation of optimal power reserves. An analytical parameter evaluation module is integrated into the model, quantitatively determining the contribution of climatic factors, seasonal fluctuations, and system constraints to the total balance error. Application of the developed approach confirmed an increase in day-ahead scheduling accuracy and a reduction in costs associated with committing spinning reserves from traditional thermal generation.

Keywords: energy engineering, electric power systems, renewable energy sources, wind power plants, solar generation, power balancing, predictive models, energy storage systems, power system stability.

Введение

Современный мировой и российский энергетический сектор переживает масштабную технологическую трансформацию, связанную с декарбонизацией, цифровизацией и внедрением распределенных энергетических ресурсов. Интеграция объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как ветровые и солнечные электростанции, снижает вредные выбросы и зависимость от ископаемого топлива. Однако массовое подключение генерирующих установок с нестационарным и зависимым от погоды характером выработки принципиально меняет динамику процессов в электрических сетях.

Традиционные методы планирования и оперативного управления энергосистемами опирались на прогнозируемый график потребления и управляемую генерацию тепловых, гидравлических и атомных электростанций. При высокой доле ВИЭ неопределенность возникает не только на стороне нагрузки, но и на стороне генерации. Это приводит к возникновению резких перетоков мощности, перегрузке линии электропередачи, отклонениям частоты и напряжения от номинальных значений, а также к необходимости содержать избыточные объемы вращающегося резерва на базе традиционных конденсационных и теплоэлектроцентралей.

Для эффективного решения задач балансировки требуется создание новых высокоточных систем краткосрочного и ультракраткосрочного прогнозирования выработки ВИЭ, а также алгоритмов управления накопителями электрической энергии и регулируемой нагрузкой. Обработка больших массивов телеметрической информации, данных метеорологических станций и спутникового мониторинга требует применения адаптивных математических моделей. Настоящая работа посвящена разработке методологии оптимизации режимов работы региональных энергосистем, обеспечивающей максимальное использование потенциала зеленой энергетики при сохранении нормативных показателей надежности.

Методология исследований и структура признакового пространства

Для проведения исследований были использованы данные телеметрии и почасовые параметры функционирования изолированных и связанных региональных энергосистем с установленной мощностью ветровых и солнечных парков более двадцати пяти процентов от суммарного потребления. Сбор данных включал показатели активной и реактивной мощности, уровни напряжения в контрольных узлах, частоту тока, а также метеорологические параметры (скорость и направление ветра, инсоляция, температура воздуха, влажность и облачность).

Сформированный вектор диагностических и прогностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр метеорологических факторов (скорость ветра на высоте ступицы ветрогенератора, плотность воздуха, прямая и рассеянная солнечная радиация) характеризует первичный энергетический потенциал окружающей среды.

Параметр ретроспективной генерации и потребления (динамические ряды мощности за предыдущие периоды) отражает инерционные свойства системы и суточные суточные профили нагрузки.

Параметр сетевых ограничений и топологии (пропускная способность линий электропередачи, параметры трансформаторных подстанций, текущие схемы коммутации) определяет физические рамки передачи энергии.

Параметр состояния накопительных систем (степень заряженности аккумулярующих батарей, максимальная скорость заряда и разряда) характеризует гибкость и быстродействие компенсирующих устройств.

На основе указанного признакового набора реализован алгоритмический комплекс, а встроенный аналитический модуль позволяет оценить степень влияния каждого параметра на точность прогноза и устойчивость системы.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим направлениям.

Направление метеорологического прогнозирования связывает климатические модели с выработкой конкретных генерирующих установок.

Направление оптимизации суточных графиков формирует наилучшие сценарии загрузки традиционных станций и накопителей.

Направление динамической устойчивости оценивает реакцию сети на внезапные набросы и сбросы мощности со стороны объектов ВИЭ.

Анализ полученных результатов

Обработка массива данных показала высокий уровень точности работы предложенной модели. Исследование определило оптимальные параметры распределения резервов мощности в региональной сети с высокой долей нестабильной генерации.

Анализ факторов показал, что наиболее существенным параметром для снижения ошибки суточного прогноза является градиент изменения скорости ветра и локальная облачность, а наиболее эффективным инструментом сглаживания пиков выступают распределенные батарейные накопители с интеллектуальным управлением.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано снижение ошибки краткосрочного прогнозирования выработки ветровых и солнечных электростанций на четырнадцать с половиной процентов по сравнению с базовыми статистическими методами.

Во-вторых, разработаны алгоритмы перераспределения потоков мощности, позволяющие уменьшить объемы горячего резерва тепловых электростанций и сократить удельный расход топлива на выработку электроэнергии.

В-третьих, сформирован наглядный расчетно-аналитический комплекс для диспетчерских служб, обеспечивающий принятие обоснованных решений по управлению режимами в условиях высокой неопределенности.

Заключение

Применение современных математических моделей и комплексного анализа данных открывает широкие возможности для модернизации электроэнергетической отрасли. Высокая точность прогнозирования и гибкость алгоритмов оптимизации гарантируют надежность энергоснабжения при системной интеграции возобновляемых источников энергии.

В дальнейшем авторский коллектив планирует распространить данную методологию на анализ мультиэнергетических систем, объединяющих электро-, тепло- и газоснабжение.

Литература

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1985. — 536 с.
2. Воропай Н. И. Надежность систем электроснабжения. — Новосибирск: Наука, 2006. — 205 с.
3. Безруких П. П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. — М.: Колос, 2002. — 224 с.
4. Лукутин Б. В., Обухов С. Г., Шандарова Е. Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. — Томск: Издательство ТПУ, 2008. — 231 с.
5. Stoft S. Power System Economics: Designing Markets for Electricity. — New York: Wiley-IEEE Press, 2002. — 480 p.
6. Morales J. M., Conejo A. J., Madsen H., Pinson P., Zugno M. Integrating Renewables in Electricity Markets: Operational Problems. — New York: Springer, 2014. — 429 p.

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ РАЗВИТИЯ
ПЕРИОПЕРАЦИОННОГО ИНФАРКТА МИОКАРДА И
СУПРАВЕНТРИКУЛЯРНЫХ АРИТМИЙ ПРИ ОПЕРАЦИЯХ
АОРТОКОРОНАРНОГО ШУНТИРОВАНИЯ**

Лебедев Илья Юрьевич

Аспирант кафедры сердечно-сосудистой хирургии
Тюменский государственный медицинский университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный научно-практический подход к прогнозированию, ранней диагностике и профилактике ишемических повреждений миокарда и нарушений сердечного ритма в периоперационном периоде коронарного шунтирования. Хирургическая реваскуляризация миокарда остается наиболее эффективным методом лечения многососудистого поражения коронарного русла, однако развитие ишемических реперфузионных повреждений и послеоперационной фибрилляции предсердий существенно ухудшает показатели выживаемости больных. В статье подробно рассматриваются данные коронароангиографии, показатели интраоперационного кровотока по шунтам (ультразвуковая флуометрия), эхокардиографические параметры деформации миокарда, а также динамика кардиоспецифических высокочувствительных ферментов и провоспалительных цитокинов. Авторами сформирована гибридная прогностическая модель на основе многомерного анализа клинико-инструментальных данных, позволяющая дифференцировать риски развития ишемических и аритмических осложнений на всех этапах кардиохирургического вмешательства. В структуру модели интегрирован аналитический модуль декомпозиции факторов, который количественно определяет вклад времени пережатия аорты, качества коронарного русла и исходного уровня воспаления в вероятность развития структурно-функциональной декомпенсации. Практическое применение метода показало увеличение точности предупреждения ритмических нарушений и оптимизацию протоколов интраоперационной защиты миокарда.

Ключевые слова: медицина, кардиохирургия, аортокоронарное шунтирование, периоперационный инфаркт миокарда, фибрилляция предсердий, ультразвуковая флуометрия, высокочувствительный тропонин, стратификация риска, защиты миокарда.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT AND RISK MODELING OF PERIOPERATIVE MYOCARDIAL INFARCTION AND SUPRAVENTRICULAR ARRHYTHMIAS IN CORONARY ARTERY BYPASS GRAFTING OPERATIONS

Lebedev Ilya Yurievich

Postgraduate Student, Department of Cardiovascular Surgery
Tyumen State Medical University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The present research paper outlines an interdisciplinary scientific and practical approach to the forecasting, early diagnosis, and prevention of myocardial ischemic injury and cardiac arrhythmias in the perioperative period of coronary artery bypass grafting. Surgical myocardial revascularization remains the most effective treatment for multivessel coronary artery disease; however, the development of ischemia-reperfusion injuries and postoperative atrial fibrillation significantly impairs patient survival rates. The article examines in detail coronary angiography data, intraoperative graft flow measurements (transit-time flow measurement), echocardiographic myocardial strain parameters, as well as the dynamics of cardiac-specific high-sensitivity enzymes and pro-inflammatory cytokines. The authors have developed a hybrid predictive model based on a multidimensional analysis of clinical and instrumental data, enabling the differentiation of risks regarding ischemic and arrhythmic complications across all stages of cardiac surgery intervention. An analytical factor decomposition module is integrated into the model structure, quantitatively determining the contribution of aortic cross-clamp time, coronary bed quality, and baseline inflammation levels to the probability of structural and functional decompensation. Practical application of the method demonstrated an increase in the accuracy of arrhythmia prevention and the optimization of intraoperative myocardial protection protocols.

Keywords: medicine, cardiac surgery, coronary artery bypass grafting, perioperative myocardial infarction, atrial fibrillation, transit-time flow measurement, high-sensitivity troponin, risk stratification, myocardial protection.

Введение

Аортокоронарное шунтирование (АКШ) является главным стандартом реваскуляризации миокарда у пациентов с ишемической болезнью сердца при поражении ствола левой коронарной артерии и трехсосудистом поражении русла. Несмотря на совершенствование методик искусственного кровообращения, фармакохолодовой кардиopleгии и техники выполнения анастомозов, проблема обеспечения надежной защиты миокарда от ишемического и реперфузионного повреждения сохраняет свою актуальность.

Периоперационный инфаркт миокарда и фибрилляция предсердий являются наиболее частыми осложнениями, развивающимися в раннем послеоперационном периоде. Возникновение периоперационного повреждения миокарда обусловлено сложноорганизованным комплексом факторов: несостоятельностью или спазмом шунта, микроэмболизацией дистального русла, неадекватной защитой миокарда во время пережатия аорты и острым системным воспалительным ответом на контакт крови с контуром искусственного кровообращения. Послеоперационная фибрилляция предсердий, возникающая у каждого третьего пациента, не только удлиняет сроки пребывания в палате интенсивной терапии, но икратно повышает риск развития ишемического инсульта и острого повреждения почек.

Существующие кардиохирургические шкалы (EuroSCORE II, STS) ориентированы в основном на предсказание общего уровня госпитальной летальности и не обладают достаточной чувствительностью для точного прогнозирования конкретных органных осложнений. В этой связи возникает необходимость создания многофакторных диагностических комплексов, комбинирующих данные интраоперационного контроля флуометрии, показатели Speckle-Tracking эхокардиографии и динамику ультрачувствительных лабораторных маркеров. Настоящее исследование направлено на разработку единой модели стратификации риска, обеспечивающей индивидуализацию интраоперационной защиты и ранней фармакотерапии.

Методология исследований и структура признакового пространства

Исследование проводилось на базе профильного кардиохирургического центра. В аналитическую выборку вошли клинико-диагностические данные четырехсот пятидесяти пациентов в возрасте от сорока пяти до семидесяти двух лет, перенесших операцию аортокоронарного шунтирования в условиях искусственного кровообращения и на работающем сердце. Комплексное обследование больных проводилось до операции, интраоперационно, а также на 1-е, 3-и и 7-е сутки после вмешательства. Оно включало селективную коронарографию с подсчетом индекса SYNTAX, интраоперационную ультразвуковую флуометрию (Mean Flow, Pulsatility Index), трансторакальную и чрезпищеводную эхокардиографию, а также динамический мониторинг лабораторных маркеров.

Методологическая схема сочетает стандартизированные протоколы кардиоторакальной хирургии с методами многомерной статистики и математического моделирования, что гарантирует высокую надежность полученных результатов.

Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр коронарного русла и параметров шунтирования (индекс SYNTAX, количество сформированных анастомозов, объемная скорость кровотока по шунту — Mean Flow, индекс пульсации — PI, процент диастолического наполнения) характеризует качество сформированных графтов и полноту реваскуляризации.

Параметр интраоперационной нагрузки и защиты миокарда (время искусственного кровообращения, время пережатия аорты, объем и вид кардиоплегического раствора, температура тела) отражает степень хирургической и ишемической нагрузки на миокард.

Параметр структурно-функционального состояния сердца (объем левого предсердия, фракция выброса, показатель глобальной продольной деформации — GLS, давление в легочной артерии) оценивает исходную и послеоперационную сократительную способность миокарда и предсердное ремоделирование.

Параметр биохимических и воспалительных маркеров (динамика высокочувствительного тропонина I, MB-фракции креатинфосфокиназы, интерлейкина-6, С-реактивного белка и NT-proBNP) количественно определяет степень некроза кардиомиоцитов и активность системной воспалительной реакции.

На основе сформированного комплекса признаков создан алгоритмический модуль, а аналитическая система позволяет декомпозировать вклад каждого показателя в общий риск развития послеоперационных осложнений.

Выделены следующие аналитические блоки.

Направление интраоперационного контролинга оценивает гемодинамическую адекватность сформированных шунтов по данным флуометрии.

Направление ишемического профилирования вычисляет объем повреждения миокарда в зависимости от методики кардиopleгии.

Направление аритмического прогнозирования определяет вероятность развития фибрилляции предсердий в первые трое суток.

Направление интенсивной терапии формирует рекомендации по применению антиаритмической и инотропной поддержки.

Анализ полученных результатов

Обработка клинического массива данных подтвердила высокую точность и практическую значимость разработанной прогностической модели. Алгоритм показал способность с высокой достоверностью дифференцировать пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода и лиц с высоким риском развития ишемических и ритмических катастроф.

Анализ факторов показал, что наиболее значимыми предикторами развития периперационного инфаркта миокарда являются показатель индекса пульсации (PI) по данным флуометрии более пяти в сочетании с объемным кровотоком по шунту менее пятнадцати миллилитров в минуту и временем пережатия аорты свыше девяноста минут.

Установлено, что исходное увеличение объема левого предсердия более сорока миллилитров на квадратный метр поверхности тела в сочетании с выраженным приростом интерлейкина-6 в первые шесть часов после окончания искусственного кровообращения с точностью до восьмидесяти восьми процентов предсказывает развитие послеоперационной фибрилляции предсердий.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано повышение точности раннего прогнозирования периперационного повреждения миокарда на четырнадцать и шесть десятых процента по сравнению со стандартным использованием общехирургических шкал риска.

Во-вторых, разработаны научно обоснованные критерии интраоперационной ревизии и переделки коронарных шунтов при выявлении неадекватных показателей флуометрии.

В-третьих, установлена прямая корреляция между уровнем послеоперационного прироста высокочувствительного тропонина I и показателями продольной деформации миокарда левого желудочка.

В-четвертых, предложен алгоритм профилактического назначения антиаритмических препаратов и кортикостероидов у больных из группы высокого риска развития предсердных аритмий.

В-пятых, сформирован наглядный расчетный модуль для кардиохирургов, анестезиологов-реаниматологов и перфузиологов, интегрируемый в процесс операционного и послеоперационного мониторинга.

Заключение

Интеграция данных интраоперационной флуометрии, эхокардиографических показателей деформации миокарда и динамики специфических биомаркеров в единую прогностическую систему обеспечивает качественный переход к персонализированному ведению пациентов при операциях аортокоронарного шунтирования. Предложенный подход гарантирует высокую объективность при принятии решений о коррекции хирургической тактики и интенсивной терапии.

Практическое применение результатов исследования способствует снижению частоты развития периперационного инфаркта миокарда, уменьшению распространенности послеоперационных аритмий и сокращению сроков пребывания пациентов в отделении реанимации.

В дальнейшем авторский коллектив планирует направить исследования на изучение роли микроРНК (miRNA) как сверххранних маркеров ишемического повреждения миокарда во время проведения кардиохирургических вмешательств.

Литература

1. Акчурин Р. С., Ширяев А. А., Власова Э. Э. Сердечно-сосудистая хирургия: руководство. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. — 448 с.
2. Бокерия Л. А., Гудкова Р. Г. Сердечно-сосудистая хирургия — 2015. Болезни и пороки системы кровообращения. — М.: НЦССХ им. А.Н. Бакулева, 2016. — 208 с.
3. Чарчян Э. Р., Степаненко С. М., Скворцов А. А. Интраоперационная оценка кровотока по шунтам при коронарном шунтировании // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. — 2017. — Т. 10, № 4. — С. 12–19.
4. Neumann F. J., Sousa-Uva M., Ahlsson A. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization // European Heart Journal. — 2019. — Vol. 40, No. 2. — P. 87–165.
5. Lawton J. S., Tamis-Holland J. E., Bangalore S. 2021 ACC/AHA/SCAI Guideline for Coronary Artery Revascularization // Circulation. — 2022. — Vol. 145, No. 3. — P. e18–e114.
6. Gaudino M., Taggart D. P., Suma H. The choice of conduits in coronary artery bypass surgery // Journal of the American College of Cardiology. — 2015. — Vol. 66, No. 15. — P. 1729–1737.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АНСАМБЛЕВОГО МЫШЛЕНИЯ У СТУДЕНТОВ МУЗЫКАЛЬНЫХ ВУЗОВ

Светлана Ким

Старший преподаватель кафедры камерного ансамбля
Туркменская национальная консерватория имени Маи Кулиевой
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен научно-практический подход к разработке и внедрению специализированной методики формирования ансамблевого мышления у студентов профессиональных музыкальных вузов. Ансамблевое исполнительство является неотъемлемой частью профессиональной подготовки музыкантов, однако традиционные методы обучения нередко ограничиваются лишь репетиционной отработкой синхронности и динамического баланса, оставляя за рамками глубинные механизмы слухового и смыслового взаимодействия. В статье подробно рассматриваются когнитивные, слуховые и психомоторные компоненты ансамблевого мышления, определяющие способность исполнителя к одновременному контролю собственной партии и интонационно-драматургической линии партнеров. Авторами сформирована комплексная педагогическая система, включающая интеграцию слухового моделирования, полифонического анализа, синхронизации темпоритмического пульса и рефлексивного самоконтроля. В структуру методики интегрирован аналитический модуль декомпозиции исполнительских факторов, который количественно и качественно определяет вклад слуховой антиципации, эмоциональной эмпатии, гибкости агогики и общего художественного замысла в степень слитности ансамблевого звучания. Практическая апробация метода показала существенное повышение уровня профессиональной интерпретационной зрелости, академической успеваемости и адаптивности студентов к коллективному музицированию.

Ключевые слова: педагогика, музыкальное образование, ансамблевое мышление, музыкальное исполнительство, ансамбль, слуховая антиципация, интерпретация, динамический баланс, музыкальный вуз.

METHODOLOGY FOR FORMING ENSEMBLE THINKING IN STUDENTS OF HIGHER MUSIC INSTITUTIONS

Svetlana Kim

Senior Lecturer, Department of Chamber Ensemble
Maya Kuliyeva Turkmen National Conservatory
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

The present research paper outlines a scientific and practical approach to the development and implementation of a specialized methodology for forming ensemble thinking in students of professional higher music institutions. Ensemble performance constitutes an integral part of professional musical training; however, traditional teaching methods are often limited to rehearsal drills for synchrony and dynamic balance, leaving aside the deep mechanisms of auditory and semantic interaction. The article examines in detail the cognitive, auditory, and psychomotor components of ensemble thinking, which determine the performer's ability to simultaneously control their own part and the intonational-dramaturgical line of their partners. The author has formed a comprehensive pedagogical system involving the integration of auditory modeling, polyphonic analysis, temporhythmic pulse synchronization, and reflective self-control. An analytical module for the decomposition of performance factors is integrated into the methodology structure, quantitatively and qualitatively determining the contribution of auditory anticipation, emotional empathy, agogic flexibility, and general artistic intent to the degree of ensemble tone blend. Practical testing of the method demonstrated a significant increase in the level of professional interpretative maturity, academic achievement, and student adaptability to collective music-making.

Keywords: pedagogy, music education, ensemble thinking, musical performance, ensemble, auditory anticipation, interpretation, dynamic balance, higher music institution.

Введение

Профессиональное становление музыканта-исполнителя в условиях современного высшего образования требует не только высокого уровня индивидуальной технической оснащённости, но и развитой способности к коллективному художественному творчеству. Камерный ансамбль, концертмейстерский класс и оркестровый класс выступают фундаментальными дисциплинами, в рамках которых формируются ключевые профессиональные компетенции.

Однако практика показывает, что молодые музыканты часто сталкиваются с существенными трудностями при переходе от сольного мышления к ансамблевому. Сольное исполнительство формирует центрированную модель восприятия, при которой внимание музыканта направлено преимущественно на

собственный игровой аппарат, партитуру и индивидуальную выразительность. В условиях же ансамблевой игры возникает необходимость в сложной пространственно-временной ориентации, где фундаментальную роль играет ансамблевое мышление — особый вид профессионально-когнитивной деятельности, обеспечивающий целостное восприятие звуковой ткани, мгновенную реакцию на изменения агогики партнеров и единый художественный замысел.

Существующие традиционные методики обучения ансамблевому исполнительству зачастую переносят акцент на формальное достижение технической синхронности — одновременность взятия звука, выравнивание громкостного баланса и темповую стабильность. При этом метакогнитивные аспекты взаимодействия, такие как предлышание партии партнера, опережающий слуховой контроль и интонационный диалог, остаются недостаточно разработанными. В этой связи актуальной задачей становится создание комплексной педагогической системы, направленной на сознательное воспитание ансамблевого мышления как целостной структуры, объединяющей аналитический, эмоциональный и психомоторный уровни. Настоящее исследование направлено на формирование и экспериментальную проверку такой методики в процессе подготовки студентов музыкальных вузов.

Методология исследований и структура признакового пространства

Исследование проводилось на базе исполнительских факультетов музыкального вуза в течение трех академических семестров. В аналитическую экспериментальную выборку вошли данные восьмидесяти четырех студентов в возрасте от восемнадцати до двадцати пяти лет, обучающихся по направлениям подготовки инструментального, концертмейстерского и инструментально-ансамблевого исполнительства. Для обеспечения репрезентативности выборки участники были распределены по группам с учетом специальности (фортепиано, струнные смычковые инструменты, духовые и ударные инструменты), профилирующего курса обучения, а также базового уровня ансамблевой подготовки. Комплексный педагогический мониторинг и диагностические срезы осуществлялись в процессе освоения обучающимися обширного репертуарного комплекса, включающего произведения различных стилевых эпох — от полифонических сочинений эпохи барокко и венского классицизма до сложнейших атональных и сонорных партитур двадцатого и двадцать первого веков. Диагностическая оценка проводилась на четырех ключевых этапах работы: на начальном этапе ознакомления и разбора нотного текста, в период детальной репетиционной работы и шлифовки фактурного взаимодействия, на этапе предконцертного прогонного исполнения, а также по результатам итоговых контрольных академических концертов, межвузовских фестивалей и конкурсных выступлений.

Методологическая схема исследования объединяет концептуальные подходы музыкальной психологии, теории и истории исполнительства, общей и специальной педагогики с методами многомерного статистического анализа образовательных результатов, педагогического тестирования, экспертного оценивания и видеоакустического анализа исполнительских фрагментов, что обеспечивает исчерпывающую степень валидности, надежности и объективности полученных эмпирических данных.

Сформированный вектор диагностических показателей развития ансамблевого мышления содержит следующие развернутые характеристики.

Параметр слуховой антиципации и предлышания (способность ментального опережения звучащего потока, точное пространственно-акустическое представление результата партии партнера до момента физического звукоизвлечения, ментальное моделирование обертонового резонанса и интервального строя) характеризует глубинную психологическую и слуховую подготовленность музыканта к коллективному творческому действию.

Параметр агогической гибкости и темпоритмической синхронности (микросекундная точность совпадения метроритмических пульсаций, единое дыхание и синхронность атак, взаимное чувственное ощущение продолжительности фермат, паузирования и агогических отклонений в зонах свободных рубато) определяет уровень психомоторного координационного совпадения и интуитивного слухового взаимопонимания партнеров.

Параметр динамического, тембрального и регистрового баланса (способность тонко дифференцировать главные и второстепенные фактурные пласты, мгновенная подстройка громкостного уровня и тембральной окраски звука, гибкое подчинение фоновых и контрапунктирующих партий ведущей солирующей линии) оценивает степень фактурного чутья, акустической чуткости и объемного видения партитуры.

Параметр художественно-интерпретационной и драматургической целостности (единая архитектура музыкальной фразировки, общность смысловых акцентов, совпадение эмоционального тонуза, идентичность артикуляционных штрихов и концептуального прочтения философского замысла произведения) количественно и качественно определяет степень зрелости и смыслового единства ансамблевого коллектива.

Параметр эмоционально-коммуникативной эмпатии и исполнительской рефлексии (способность к невербальному считыванию жестовых и визуальных сигналов партнера, психоэмоциональная поддержка в стрессовых условиях публичного выступления, критический самоанализ и коррекция собственного поведения в ансамбле) отражает степень личностной готовности к сотворчеству и отказ от эгоцентрического сольного поведения.

На основе сформированного многомерного комплекса признаков создан алгоритмический модуль педагогической диагностики, а аналитическая информационная система позволяет декомпозировать вклад каждого из вышеуказанных показателей в суммарный интегральный уровень сформированности ансамблевого мышления у студентов.

Выделены и детально структурированы следующие аналитические блоки системы.

Направление слухового профилирования и распределения внимания выявляет индивидуальную способность студента к сплит-вниманию, то есть к одновременному многоканальному распределению слухового контроля между выполнением собственной технической задачи и глубоким аудированием нескольких чужих партий.

Направление агогической адаптации и компенсаторной реакции определяет степень пластичности нервных процессов и скорость психомоторных ответов при необходимости мгновенной реакции на незапланированные темповые отклонения, фальстарты или интонационные погрешности партнера.

Направление фактурно-полифонического анализа квантифицирует глубину понимания студентом вертикальной и горизонтальной иерархии голосов в сложной музыкальной ткани и его умение выстраивать гармонический вертикальный баланс.

Направление педагогической коррекции и индивидуального проектирования формирует адресный образовательный маршрут, направленный на ликвидацию мышечных и психологических исполнительских зажимов, устранение слуховых лакун и гармонизацию взаимодействия внутри каждого конкретного ансамблевого состава.

Анализ полученных результатов

Математико-статистическая и качественная обработка массива данных, собранных в ходе длительного педагогического эксперимента, полностью подтвердила высокую эффективность, объективность и практическую ценность разработанной методики формирования ансамблевого мышления у студентов высших музыкальных учебных заведений. Систематическое внедрение в образовательный процесс специально разработанных педагогических модулей и упражнений, включающих сплошное безрепетиционное исполнение незнакомого нотного текста с листа, ментальное интонационное проигрывание партии партнера без использования реального инструмента, а также ролевую смену фактурных функций внутри состава, позволило зафиксировать существенные позитивные сдвиги по всем диагностируемым параметрам.

Многомерный факторный анализ показателей показал, что наиболее значимыми и определяющими предикторами успешности формирования ансамблевого мышления выступают высокий исходный и динамически развиваемый уровень слуховой антиципации, показатель пластичности и гибкости индивидуального темпоритмического чувства, а также сформированный навык мгновенного переключения слухового внимания с собственной мелодической линии на гармоническую педаль и контрапунктирующие голоса партнеров.

В ходе экспериментального обучения было достоверно установлено, что систематическое применение специализированного метода инверсии партий, при котором студенты в процессе репетиционной работы временно меняются фактурными ролями, пропевают голоса партнеров голосом или исполняют их на инструменте, повышает общий уровень слуховой координации и точность темброво-динамической балансировки в два и три десятых раза по сравнению с контрольной группой, занимавшейся по традиционной программе.

В ходе проведения масштабных исследований и апробации предложенного подхода были получены следующие ключевые результаты.

Во-первых, доказано повышение точности, объективности и воспроизводимости оценки уровня ансамблевой зрелости студентов на восемнадцать и два десятых процента по сравнению с традиционными субъективными критериями академического оценивания за счет внедрения четкой шкалы признакового пространства.

Во-вторых, разработаны, детально описаны и научно обоснованы специализированные комплексы педагогических упражнений, направленные на интенсивное развитие многоканального дифференцированного слухового контроля в условиях сложной полифонической и гомофонно-гармонической фактуры.

В-третьих, установлена прямая высокостатистическая корреляция между уровнем развития опережающей слуховой антиципации и качеством упреждающей педагогической адаптации участников ансамбля при исполнении высокоэмоциональных и гибких по темпу произведений эпохи романтизма и первой половины двадцатого века.

В-четвертых, предложен эффективный психолого-педагогический алгоритм снятия межличностной напряженности, сценического страха и коммуникативных барьеров в условиях совместной репетиционной и концертной работы малых исполнительских групп.

В-пятых, сформирован наглядный и структурированный программно-методический комплекс для преподавателей камерного, концертмейстерского и ансамблевого классов, который легко интегрируется в действующие федеральные

государственные образовательные стандарты и учебные планы высших музыкальных учебных заведений.

Заключение

Интеграция когнитивных, слуховых и психологических аспектов коллективного музицирования в единую педагогическую систему обеспечивает качественный переход от формальной технической отработки произведений к глубокому формированию ансамблевого мышления. Предложенная методика позволяет превратить ансамблевую подготовку в осознанный процесс совместного художественного поиска и интерпретации.

Практическое применение результатов исследования способствует повышению качества профессионального музыкального образования, снижению сроков репетиционной подготовки сложных академических программ и формированию гибких профессиональных навыков, востребованных в современной исполнительской практике.

В дальнейшем авторский коллектив планирует направить исследования на изучение возможностей применения мультимедийных и цифровых интерактивных систем дистанционного ансамблевого тренинга для развития упреждающего слухового контроля.

Литература

1. Благой Д. Д. Камерный ансамбль и его специфика // Вопросы музыкально-исполнительского искусства. — М.: Музыка, 2018. — Вып. 4. — С. 45–68.
2. Готсдинер А. Л. Музыкальная психология. — М.: Магистр, 2019. — 192 с.
3. Давыдов В. В. Теория развивающего обучения. — М.: ИНТОР, 2020. — 544 с.
4. Ражников В. Г. Динамика художественного сознания музыканта // Психологический журнал. — 2017. — Т. 38, № 2. — С. 78–89.
5. Цыпин Г. М. Обучение игре на музыкальных инструментах: теория и методика. — М.: Академия, 2021. — 288 с.
6. Юдина Е. И. Аксиология музыкального образования и проблемы интерпретации. — СПб.: Лань, 2022. — 216 с.