



МУН ДЛЯ  
БАЖЕНОВСКОЙ  
СВИТЫ

ВИРТУАЛЬНАЯ  
РАСХОДОМЕТРИЯ

КЛАСТЕРНЫЙ  
АНАЛИЗ

# Нефтегаз.RU

ДЕЛОВОЙ ЖУРНАЛ

ИНТЕРЕСНО О СЕРЬЕЗНОМ

ISSN 2410-3837

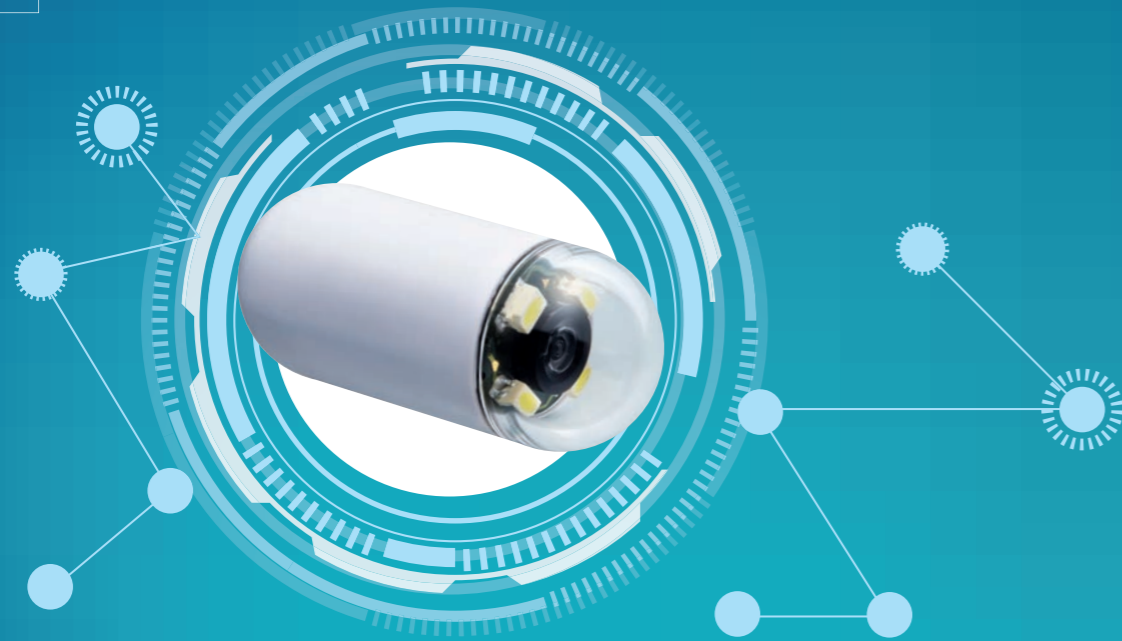
5–6 [125–126] 2022

## НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ



Входит в перечень ВАК

РЕКЛАМА



Видеокапсульная эндоскопия всего кишечника  
в GMS Clinics & Hospitals

# ВОЛШЕБНАЯ КАПСУЛА

## Как это работает?

### Капсульная эндоскопия для взрослых и детей

Данный вид обследования проводится без наркоза и во время проведения исследования человек абсолютно свободен в передвижении, не надо оставаться в клинике, можно работать или заниматься домашними делами.

### Персонализированный подход к пациенту

Мы сопровождаем Вас на всех этапах: подготовке, самом исследовании. По итогам обследования ваш врач даст вам все необходимые рекомендации или направление к другим специалистам для дальнейшего лечения.



Сделать гастроскопию и колоноскопию теперь могут даже самые занятые люди. Без дискомфорта. Без психологического напряжения. Считается, что каждый человек должен начать проходить скрининговое исследование с возраста 45 лет.

В GMS работают высококвалифицированные врачи-эндоскописты с многолетней практикой и опытом работы в лучших зарубежных клиниках и госпиталях. Среди главных преимуществ нашего отделения диагностики можно уверенно выделить:



*Международные стандарты диагностики*



*Оснащенность эндоскопическим оборудованием  
экспертного уровня*



*Индивидуальный деликатный подход*



*Минимальное влияние на ваш график*



*Наличие современных палат для подготовки  
к диагностике и восстановлению после нее*

Залесова  
Виктория Геннадьевна

Врач высшей категории, эндоскопист,  
кандидат медицинских наук

**GMS**  
Global Medical System  
**Hospital**



 (495) **023-64-17**

На правах рекламы

О ВОЗМОЖНЫХ ПРОТИВОПОКАЗАНИЯХ

ПРОКОНСУЛЬТИРУЙТЕСЬ СО СПЕЦИАЛИСТОМ

ООО «ДЖИ ЭМ ЭС ХОСПИТАЛ» | Лицензия №ЛО-77-01-017495

**Разработка моделей прогнозирования выбросов оксидов углерода и азота газовых турбин на основе генетических алгоритмов**



14

**Нейросетевое моделирование. Прогнозирование показателей добычи скважин в условиях нестационарного заводнения**



26

**Анализ и интерпретация цифровых данных давления и добычи углеводородов для оптимизации разработки месторождений**



34

**Опыт проведения высокорасходного МГРП**



42

*Эпохи НГК* 4

**РОССИЯ Главное**

Лекарство от голландской болезни 6

Без драматизма 8

*События* 10

*Первой строчкой* 12

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ**

Разработка моделей прогнозирования выбросов оксидов углерода и азота газовых турбин на основе генетических алгоритмов 14

«Техэксперт»: цифровизация начинается с нормативных документов 22

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ**

Нейросетевое моделирование. Прогнозирование показателей добычи скважин в условиях нестационарного заводнения 26

Анализ и интерпретация цифровых данных давления и добычи углеводородов для оптимизации разработки месторождений 34

**ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ**

Как обеспечить технологическую устойчивость при переходе на отечественные ИТ-решения в нефтегазовом секторе 38

**НЕФТЕСЕРВИС**

Опыт проведения высокорасходного МГРП 42

Развитие, как ответ новым реалиям. Российские нефтесервисные компании трансформируют сложности в возможности 46

**Гидратовмещающие породы и осложнения, связанные с их вскрытием**



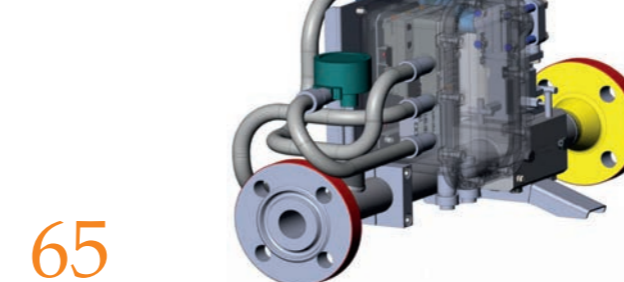
50

**Химические, газовые и тепловые МУН для баженовской свиты**



58

**Инструментализированная виртуальная расходометрия. Анализ результатов применения на скважинах Восточно-Макаровского ГКМ**



65

**Кластерный анализ для идентификации прорыва закачиваемых вод в нефтедобывающих скважинах**



77

**НЕФТЕСЕРВИС**

Гидратовмещающие породы и осложнения, связанные с их вскрытием 50

Техника и технологии для трудноизвлекаемых запасов углеводородов 56

Химические, газовые и тепловые МУН для баженовской свиты 58

Инструментализированная виртуальная расходометрия. Анализ результатов применения на скважинах Восточно-Макаровского ГКМ 65

Рентгенография как новый подход к измерению межфазного натяжения и краевого угла смачивания в пластовых условиях 72

Кластерный анализ для идентификации прорыва закачиваемых вод в нефтедобывающих скважинах 77

**ПРАВО**

Страхование плана ЛАРН 82

**РЫНОК**

Российский рынок газомоторного топлива: достижимы ли амбициозные цели? 84

**ТРАНСПОРТИРОВКА**

Интеллектуальный мониторинг 90

**ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ**

Конверсия ПНГ в электрическую и тепловую энергию на энергоцентрах собственных нужд месторождений 94

**MODUS VIVENDI**

Едем в Крым: возможности делового туризма 98

Как вы проведете свой отпуск? Есть идея! 100

**ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ**

Механизированная добыча нефти 102

Экспоненты и экспонаты Нефтегаз-2022 108

*Цитаты* 112

# СОДЕРЖАНИЕ

**838 лет назад**

В 1184 году половецкий хан Кончак одержал победу над новгород-северским князем Игорем благодаря использованию «греческого огня», одним из компонентов которого была нефть.

**202 года назад**

В 1820 году добыча нефти была объявлена государственной монополией.

**152 года назад**

В 1870 году в Баку добыли первую промышленную нефть из скважины.

**134 года назад**

В 1888 году добыча нефти в Российской империи была сравнима с добычей нефти в США, через 10 лет количество добываемой нефти превысило аналогичные показатели Соединенных Штатов.

**127 лет назад**

В 1895 году Россия занимала 45% мирового рынка нефти, добыча составляла 6,5 млн тонн.

**93 года назад**

В 1929 году на берега реки Ухты в район бывшего кустарного промысла прибыла первая геологоразведочная экспедиция.

**90 лет назад**

В 1932 году был основан Ухто-Печорский трест, которому было поручено заложить на месторождении Чибью нефтепромысел и построить установку для получения керосина.

**82 года назад**

В 1940 году 70% добываемой в СССР нефти приходилось на долю бакинских месторождений.

**58 лет назад**

В 1964 году было открыто Вуктыльское газоконденсатное месторождение.

**55 лет назад**

В 1967 году началось строительство газопровода Вуктыл–Торжок, на строительстве которого впервые в мире были использованы трубы диаметром 1220 мм.

**42 года назад**

В 1980 году открылась первая в мире ветряная электростанция на 20 турбин.

Издательство Neftegaz.RU

**РЕДАКЦИЯ**

**Главный редактор**  
Ольга Бахтина

**Шеф-редактор**  
Анна Павлихина

**Редактор**  
Анастасия Никитина

**Аналитики**  
Артур Гайгер  
Дарья Беляева

**Журналисты**  
Анна Игнатьева  
Елена Алифинова  
Сабина Бабаева  
Екатерина Свинцова

**Дизайн и верстка**  
Елена Валетова

**Корректор**  
Виктор Блохин

**РЕДКОЛЛЕГИЯ**

**Ампилов Юрий Петрович**  
д.т.н., профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова

**Алюнов Александр Николаевич**  
Вологодский государственный университет

**Бажин Владимир Юрьевич**  
д.т.н., эксперт РАН, Санкт-Петербургский горный университет

**Гриценко Александр Иванович**  
д.т.н., профессор, академик РАН

**Гусев Юрий Павлович**  
к.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО НИУ МЭИ

**Данилов-Данильян Виктор Иванович**  
д.э.н., профессор, член-корреспондент РАН, Институт водных проблем РАН

**Двойников Михаил Владимирович**  
д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет

**Еремин Николай Александрович**  
д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

**Илюхин Андрей Владимирович**  
д.т.н., профессор, Советник РААСН, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

**Каневская Регина Дмитриевна**  
действительный член РАН, д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

**Макаров Алексей Александрович**  
д.э.н., профессор, академик РАН, Институт энергетических исследований РАН

**Мастепанов Алексей Михайлович**  
д.э.н., профессор, академик РАН, Институт энергетической стратегии

**Панкратов Дмитрий Леонидович**  
д.т.н., профессор, Набережночелнинский институт

**Половинкин Валерий Николаевич**  
научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр», д.т.н., профессор, эксперт РАН

**Сальгин Валерий Иванович**  
д.т.н., член-корреспондент РАН, профессор МИЭП МГИМО МИД РФ

**Третьяк Александр Яковлевич**  
д.т.н., профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет



Издательство:  
ООО Информационное агентство Neftegaz.RU

**Директор**  
Ольга Бахтина

**Представитель в Евросоюзе**  
Виктория Гайгер

**Отдел рекламы**  
Дмитрий Аверьянов  
Ольга Щербакова  
Валентина Горбунова  
Анна Егорова  
Марина Шевченко  
Галина Зуева  
rg@neftgaz.ru  
Тел.: +7 (495) 778-41-01

**Служба технической поддержки**  
Сергей Прибыткин  
Алексей Лозгачев  
Николай Лозгачев

**Отдел по работе с клиентами**  
Екатерина Данильчук

**Выставки, конференции, распространение**  
Мария Короткова

Деловой журнал Neftegaz.RU зарегистрирован федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия в 2007 году, свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-46285

**Адрес редакции:**  
123001, г. Москва, Благовещенский пер., д. 3, с.1  
Тел.: +7 (495) 778-41-01  
www.neftgaz.ru  
e-mail: info@neftgaz.ru  
Подписной индекс МАП11407

Отпечатано в типографии «МЕДИАКОЛОР»

Заявленный тираж 8000 экземпляров



**Социальная газификация – президентский проект**

Мособлгаз догазифицировал 1600 населенных пунктов Подмосковья

Построено более 1 тысячи километров  
**50 тысяч жителей** подключились к газу

**Социальная газификация – это строительство газопроводов до границ участков без привлечения средств жителей в уже газифицированных населенных пунктах**



**ВСЕГО ПО ПРОГРАММЕ БУДУТ ГАЗИФИЦИРОВАНЫ 2800 НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ. 290 ТЫСЯЧ ЧЕЛОВЕК СМОГУТ ПОДКЛЮЧИТЬСЯ К ГАЗУ**



mosoblgaz.ru  
8 800 200 24 09

РЕКЛАМА



ЕС согласовали шестой пакет санкций



Значительная часть сырья поступает в Европу по нефтепроводу «Дружба»



Китай незаметно скупает российскую нефть



На информации о готовящемся шестом пакете санкций цены на нефть выросли

## ЛЕКАРСТВО ОТ ГОЛЛАНДСКОЙ БОЛЕЗНИ

Анна Павлихина

В 1977 году в издании Economist появилась статья «The dutch disease», в которой автор описывал вероятные последствия для экономики Нидерландов после открытия Гронингенского месторождения. С тех пор увеличение экспорта сырья какой-либо страной, приводящее к снижению эффективности ее экономики, принято называть «голландской болезнью».

В конце мая члены ЕС согласовали шестой пакет санкций, включающих эмбарго на морские поставки российской нефти. Трубопроводы, по которым страны ЕС получают треть сырья, под запрет не попали, но к концу года импорт должен сократиться на 90%.

Это жесткая мера для обеих сторон. Она в разной степени отразится на европейских странах и в разное время по-разному скажется на России. Окажет влияние и на третьи страны, которые уже стараются извлечь выгоду из ситуации, и было бы нечестно их в этом упрекать.

Около 25% нефти поступает в Европу из России, но европейские страны имеют разную степень зависимости от нее. Так, Великобритания может без труда отказаться от импорта, эксплуатируя собственные месторождения в Северном море. Франция, Испания и Португалия импортируют относительно небольшое количество, а вот Венгрия, Словакия, Финляндия и Болгария – более 75%, этим странам невозможно в один момент отказаться от российской нефти. В. Орбан даже сравнил полное эмбарго с ядерной бомбой.

Значительная часть сырья поступает по нефтепроводу «Дружба» и НПЗ на этом маршруте последние 50 лет работают на российской нефти. По признаниям главы венгерской MOL газете The New York Times, компании потребуется четыре года и 700 млн долл. США, чтобы перестроиться на использование другой нефти, потенциальным поставщиком которой может



стать Саудовская Аравия, которая еще до объявления эмбарго заявила, что, если Россия сократит объемы добычи, Саудовская Аравия увеличит свои. Подойдет также нефть из Ирана и Венесуэлы, если с этих стран снимут санкции.

Неудивительно поэтому, что европейские страны активно ищут замену российской нефти. Одновременно они также предпринимают меры, направленные на то, чтобы помешать России продавать нефть в третьи страны, прежде всего в Индию и Китай. Одной из таких мер стал запрет «покупать, импортировать или передавать сырую нефть и нефтепродукты, если они происходят или экспортируются из России. Запрещается предоставлять техническую помощь, брокерские или другие услуги».

В обход этих запретов Китай, по его мнению, незаметно, путая следы, путем перевалки с судна на судно, большими партиями закупает нефть, которую Россия предоставляет с существенными скидками.

Стоимость доставки сырья в Китай и Индию, таким образом, оказывается намного выше.

На информации о готовящемся шестом пакете санкций цены на нефть мгновенно выросли. В свете этого интересна оценка событий и меры, предпринимаемые странами. Так, Великобритания вводит «сбор на прибыль от энергетики» в размере 25%, который будут платить нефтяные компании (в связи с увеличением прибыли из-за высоких цен на сырье) и который будет отменен по мере снижения цен на нефть. По прогнозу, налог должен принести в бюджет страны около 5 млрд евро. А деньги направят на поддержание населения и экономики в условиях роста инфляции и цен на энергоносители.

В России ситуацию оценили ровно наоборот. В одной из своих публикаций Л. Федун предлагает сократить добычу на 20–30%, обосновывая предложение тем, что выгоднее продавать мало, но дорого, чем много, но дешево. Также он отмечает, что компании

вынуждены постоянно то сворачивать добычу останавливая скважины, то снова их запускать. Такие маневры сопряжены с затратами, которые не учитывает действующая налоговая система, поэтому неплохо было бы сделать режим НДС доминирующим фискальным инструментом.

При этом за первые пять месяцев текущего года, по данным газеты «Коммерсант» в качестве компенсаций за поставки топлива на внутренний рынок нефтяные компании могут получить 1,2 трлн руб., что почти вдвое больше, чем выплаты за весь прошлый год. Несмотря на отсутствие всяких предпосылок к росту цен на внутреннем рынке, Минфин не собирается отказываться от субсидий.

Высокие цены на нефть российским компаниям, бесспорно, на руку. Но, очевидно, что это – картина ближайшего времени, долгосрочная перспектива выглядит совсем иначе.

Происходящее – не просто перегруппировка сил на рынке энергоносителей. То, что Европа уже не вернется к прежнему тесному сотрудничеству с Россией, очевидно. За время охлаждения отношений (которое, безусловно, рано или скорее поздно пройдет) страны Европы переориентируют свой импорт (уже увеличились поставки из США, Западной Африки и Ближнего Востока, так, в начале мая Великобритания впервые за два последних года получит партию нефти из ОАЭ). В ряде случаев ископаемое топливо будет и вовсе заменено, вероятно, проблемы с получением нефти и газа по привычным каналам ускорят переход на ВИЭ, электромобили, водородную энергетику. Россия в это время переориентирует поставки в азиатском направлении, но это не компенсирует полностью потерю европейского рынка. Будучи изолированной от мировой экономики, ей придется форсировано искать нефтяные источники дохода.

The Wall Street Journal, отмечая важность экспорта энергоносителей для российской экономики, приводит данные МЭА, согласно которым в 2021 году нефтегазовые доходы составили 45% федерального бюджета России. Эмбарго также дорого обходится и Европе: МВФ прогнозирует, что полный запрет снизит объем производства ЕС на 3%. Разрыв нефтяных связей приведет к росту цен на энергоносители, цены на многие товары также начнут расти, а экономический рост замедлится. Сложно не согласиться с теми, кто считает, что все это подтолкнет мир к ускоренному переходу на новые виды энергоносителей. ●

## БЕЗ ДРАМАТИЗМА

Елена Алифирова

А. Новак прокомментировал прогноз по добыче нефти в России, планы реализации СПГ-проектов и господдержку проектов глубокой переработки. Добыча нефти в России в 2022 г. снизится, но не так сильно, как ожидает Минэкономразвития РФ, планы по росту производства СПГ сохраняются, меры господдержки проектов глубокой переработки прорабатываются, – сообщил А. Новак по итогам встречи сопредседателей межправкомиссии России и Ирана в г. Тегеране.

Согласно прогнозу, представленному Минэкономразвития РФ, добыча нефти и газового конденсата в России в 2022 г. по сравнению с 2021 г. в базовом сценарии снизится на 9,3%, до 475,3 млн т, в консервативном на 17,2%, до 433,8 млн т. А. Новак оценивает этот прогноз как излишне пессимистичный. Он отметил, что добыча снизилась немногим более, чем на 1 млн барр./сутки, но уже в первой половине мая увеличилась на 1,7% и продолжает расти. В 2021 г. было добыто 524 млн т, в 2022 г. прогнозируется 480–500 млн т. Таким образом, можно говорить о снижении добычи нефти в России по сравнению с 2021 г. на 4,6–8,4%. Но эти оценки исходят из сегодняшней ситуации, в случае ужесточения антироссийских санкций итоговые показатели могут значительно измениться. Много будет зависеть от сроков и формата эмбарго или других ограничений со стороны ЕС на российскую нефть и эффективности перестройки маршрутов российского экспорта.

Относительно СПГ Россия сохраняет заложенные в энергостратегии планы по увеличению производства. В последней версии энергостратегии России до 2035 г. был заложен рост производства СПГ до 80–140 млн т/год. По мнению А. Новака, Россия способна выполнить эту задачу даже с учетом использования только российских технологий сжижения. На данный момент проектная мощность действующих СПГ-заводов составляет 27,66 млн т, заводы работают на уровне выше проектного. В 2023 г. НОВАТЭК планирует запуск 1-й линии завода Арктик СПГ-2, еще две линии – в 2024–2025 гг. В программе развития СПГ до 2035 г. мощность строящихся СПГ-заводов в России оценивалась в 21,3 млн т/год.

Также А. Новак прокомментировал меры господдержки глубокой переработки в России, сообщив, что правительство прорабатывает меры по поддержке проекта комплекса по переработке этансодержащего газа в Усть-Луге и Амурского ГХК. И рассказал о реализации проекта новых энергоблоков АЭС Бушер в Иране. Несмотря на введение санкций, сроки реализации проекта не меняются. ●

## Рейтинги Neftegaz.RU

В условиях, когда иностранные производители массово покидают российский рынок, вопрос импортозамещения становится особенно острым. Учитывая, что организовать производство всех товаров, которые раньше приобретались по импорту, сразу не возможно, чему следует отдать приоритет?

В каком сегменте России нужно ускорить процесс импортозамещения?

15%

Добычное оборудование, новые месторождения требуют новых технологий

29%

Оборудование для ВИЭ-генерации, за альтернативными источниками будущее

20%

Катализаторы для нефтепереработки, в России их практически нет

15%

Контрольно-измерительные приборы, от них зависит производственная безопасность

21%

Программное обеспечение, это основная составляющая современного производства

После продолжительных переговоров страны ЕС ввели частичное эмбарго на российскую нефть. Какие последствия ожидают участников рынка?

Каких последствий следует ожидать от эмбарго на российскую нефть?

8%

Нефтяное эмбарго послужит эффективным механизмом давления на российское правительство

17%

Россия болезненно почувствует потерю доходов от нефтяного бизнеса, что скажется на ее экономике

25%

Это ослабит зависимость европейских стран от российских энергоресурсов и они быстрее перейдут к безуглеродному производству

11%

Россия безболезненно переживет эмбарго переориентировав свой углеводородный экспорт на другие рынки

39%

Импортеры и экспортеры нефтегазового рынка зависят друг от друга, любые ограничения очень чувствительны для всех участников



# Тендерный КОНСАЛТИНГ

ПОДДЕРЖКА УЧАСТНИКОВ ЗАКУПОК НА ВСЕХ ЭТАПАХ (ПО ФЗ №44 И ПО ФЗ №223)

Аккредитация на торговых площадках

Подбор тендеров по заданным параметрам

Юридический анализ тендерной документации

Подготовка тендерной заявки

Услуги специализированной организации

Оформление банковских гарантий

Оспаривание решений ФАС о внесении в «черный список поставщиков»

Юридическое сопровождение заключения и исполнения государственного контракта

Действуя строго в рамках законодательства, мы обеспечиваем вам честную победу в нужном тендере

+7 495 987 18 50 (многоканальный)

Москва, ул. Крымский вал, д.3, стр.2, офис №7 (м. Октябрьская)

Обвал рынка акций  
Выборы президента  
Запуск нового производства  
Северный поток  
Цены на нефть

Газовые войны  
Смещение капиталов  
Новый глава Роснефти

Второй ветка ВСТО  
Богучанская ГЭС запущена  
Южный поток  
Северный поток достроили

Продажа квот  
Дошли руки до Арктики  
Цены на газ



### Спустя 8 лет МГП Кысыл-сыр – Якутск достроят

Глава Якутии А. Николаев дал начало строительству третьей нитки МГП протяженностью 84 км – от поселка Кысыл-Сыр Вилуйского района до Мастахского месторождения в Кобяйском районе. Завершение работ запланировано на 2024 г.



Общий бюджет составляет 5,4 млрд руб. Сегодня потребители получают газ со Средневилуйского ГКМ по двум трубам магистрального газопровода, построенного еще

в 1967 г., благодаря новой нитке газопровода тысячи жителей Якутии смогут провести газ в свои дома, а предприятия получат возможность увеличить производственные мощности. Строительство газопровода началось в 1999 г. и за 15 лет было построено 380 км, затем на 8 лет процесс был приостановлен. МГП Средневилуйское ГКМ – Якутск является единственным каналом поставки газа потребителям в центральных районах Якутии. Этот участок – узкое место в газоснабжении Центральных и Заречных районов Якутии. Износ двух ниток магистрального газопровода, построенного в 1967 г. составляет почти 100%.

### Малотоннажный СПГ-завод в Нижегородской области

К 2023 г. в Нижегородской области планируют построить малотоннажный комплекс по производству, хранению и выдаче

СПГ производительностью 2 т в час. Завод будет стопроцентно оснащен российским оборудованием. Объем инвестиций в проект превысит 1 млрд руб. По словам гендиректора Нижегородского завода А. Крамского, компания нашла российскую замену иностранному оборудованию, но оно обошлось дороже – инвестиции с 640 млн руб. выросли до 1 млрд руб. Предполагается, что СПГ будет использоваться как ГМТ и в качестве сырья для автономной газификации области.

### Производство пигментного диоксида титана в Томской области

Росатом намерен создать в г. Северск Томской области импортозамещающее производство пигментного диоксида титана мощностью порядка 10 тыс. т в год.



Пигментный диоксид титана используют при производстве лакокрасочных материалов, пластмасс, ламинированной бумаги. Также он применяется в косметической, фармацевтической и пищевой промышленности. Проект реализуют в рамках стратегии ТВЭЛа по направлению «Специальная химия».

### Sinorec перепродает СПГ в Европу

Дочерняя компания Sinorec, зарегистрированная в Гонконге, подтвердила, что она перепродает часть своих запасов СПГ на международном рынке, заявив, что это чисто рыночные сделки.



Пекин заявил, что не присоединится к санкциям западных стран против России, но, учитывая, что сектор информационных технологий и автомобилестроения Китая зависит от поставок США и Европы, Китай хочет избежать дальнейшего противодействия западным странам.

### TotalEnergies остановила бизнес смазочных материалов в России

Французская TotalEnergies остановила работу завода по производству и смешиванию моторных масел и смазочных материалов, открытый в 2018 г. в Калужской области.

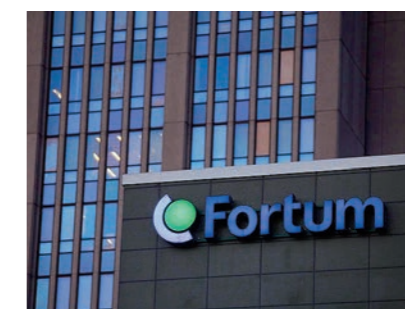
Объем инвестиций в проект составил 50 млн долл. США. Логистические возможности завода позволяли покрывать не только российский рынок, но и поставлять продукцию в страны СНГ.



Сейчас компания изучает, возможные санкции в отношении России, в частности приняли решение по Арктик СПГ 2, в котором владеет 10% и другим активам. Контракты по Ямал СПГ компания будет выполнять до тех пор, пока санкции это позволяют. Ранее TotalEnergies сообщила, что полностью прекратит закупки российской нефти и нефтепродуктов не позднее конца 2022 г.

### Финская Fortum уходит из России

Речь идет о каботажных перевозках между портами Санкт-Петербурга и Мурманска и Дальнего Востока.



На перевозку грузов по СМП будут установлены льготные тарифы, которые будут субсидироваться из федерального бюджета. Ежегодно на субсидирование таких перевозок будет

выделяться по 560 млн руб. Деньги будут направляться компаниям-перевозчикам на компенсацию недополученных из-за льготных тарифов доходов, а также расходов, связанных с заходами судов в порты. Это решение сделает перевозку грузов по СМП более выгодной и востребованной для грузоотправителей, поможет в решении вопросов северного завоза грузов и увеличит грузопоток по этому направлению. В 2022 г. по СМП планируется совершить два круговых рейса по субсидируемым из федерального бюджета тарифам.



### Siemens прекращает бизнес в России

В компании Siemens заявили о начале процедуры прекращения производственной и операционной деятельности в России в результате событий на Украине. В заявлении также говорится, что «всеобъемлющие международные санкции, текущие и потенциальные контрмеры влияют на коммерческую деятельность компании в России».

Сегодня подразделение компании Siemens Energy является одним из основных поставщиков энергооборудования для предприятий ТЭК России. ●

МВФ прогнозирует рост цены на нефть в 2022 г. **на 55%**, на газ – на **147%**

Предполагаемая цена нефти в 2022 г. составит **106,83 долл./барр.**, в 2023 г. – **92,63 долл./барр.**

До **4 трлн долл.** вырастет рынок улавливания углерода к 2050 г.

**150 млн б.н.э.** запасов углеводородов потеряет Exxon из-за выхода из проекта Сахалин-1

На догазификацию для льготников в Алтайском крае в 2022 г. выделят **250 млн рублей**

Экспорт иранской нефти с начала года вырос **на 30%**

В первом квартале страна экспортировала **870 тыс. барр.** нефти в сутки

Wintershall Dea списала более **1,5 млрд евро** по российским проектам

**4,3 млрд руб.** выделит Правительство на докапитализацию фондов развития промышленности регионов

На **125%** Росатом увеличил выработку электроэнергии от ВЭС в I квартале 2022 года

Создание Брянского энергетического кольца, завершённое компанией Россети ФСК ЕЭС, позволит обеспечить регион дополнительной мощностью в размере **250 МВт**

Инвестиции в проект превышают **8,2 млрд руб.**

Газпром за 4 месяца 2022 г. снизил добычу газа **на 2,4%**, поставки в дальнее зарубежье – **на 26,9%**

Объем поставок по МГП Сила Сибири-1 превысил аналогичный показатель прошлого года на **60%**

Строительство плавучей ветряной электростанции Goto мощностью **16,8 МВт** начнется в сентябре 2022 г. в Японии

Транзит российского газа через Украину снизился **на 18%**

Бюджет РФ в апреле недополучил **133 млрд рублей** нефтегазовых доходов

Убыток ВР из-за выхода из Роснефти составил **20 млрд**

В аналогичном периоде прошлого года компания получила прибыль в размере **4,667 млрд долл.**

На **2,3%** в годовом выражении выросло энергопотребление в России

Equinor списала **1,1 млрд** от инвестиций в российские проекты

На Алтае планируется поднять предельную цену на уголь для населения не менее чем **на 20%**

OMV списала активов **на 2 млрд евро** из-за потери Северного потока-2 и приостановки других проектов в РФ

В Ленобласти планируется догазификация **61,9 тыс.** домовладений



# РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ УГЛЕРОДА И АЗОТА ГАЗОВЫХ ТУРБИН на основе генетических алгоритмов

**Кочуева Ольга Николаевна**

доцент кафедры прикладной информатики  
и компьютерного моделирования  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,  
к.т.н.

В РАБОТЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОБЪЕМА ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ УГЛЕРОДА И АЗОТА ГАЗОВЫХ ТУРБИН, РАЗРАБОТАННЫЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ. ПРОВЕДЕН АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИЗ ОТКРЫТОГО ИСТОЧНИКА; ПРЕДСТАВЛЕН ОРИГИНАЛЬНЫЙ ПОДХОД, КОТОРЫЙ ПОЗВОЛЯЕТ ПОЛУЧАТЬ МОДЕЛИ С ХОРОШИМИ ПРОГНОЗНЫМИ КАЧЕСТВАМИ, НА ОСНОВЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ. РАЗРАБОТАННЫЕ МОДЕЛИ МОГУТ ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫБРОСОВ, ВЫЯВЛЕНИЯ СБОЕВ В РАБОТЕ ДАТЧИКОВ, ЗАМЕРЯЮЩИХ СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ, И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ, ПРИВОДЯЩИХ К УВЕЛИЧЕНИЮ ВЫБРОСОВ

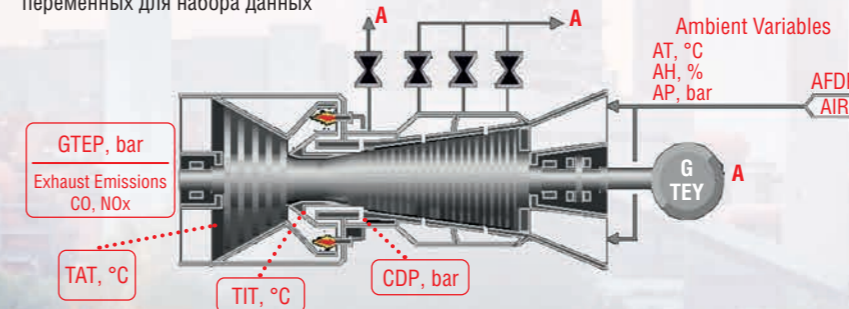
THE PAPER PRESENTS MODELS FOR FORECASTING THE VOLUME OF EMISSIONS OF CARBON AND NITROGEN OXIDES FOR GAS TURBINES, DEVELOPED ON THE BASIS OF THE SYMBOLIC REGRESSION METHOD AND GENETIC ALGORITHMS. AN ANALYSIS OF ACTUAL DATA FROM AN OPEN SOURCE WAS CARRIED OUT, AN ORIGINAL APPROACH ALLOWS OBTAINING MODELS WITH GOOD PREDICTIVE QUALITY USING A TWO-STAGE MODEL BUILDING PROCEDURE. THE DEVELOPED MODELS CAN BE USED TO CONTROL EMISSIONS, DETECT FAILURES IN THE OPERATION OF SENSORS THAT MEASURE THE CORRESPONDING INDICATORS, AND PREDICT TECHNOLOGICAL REGIMES THAT LEAD TO AN INCREASE IN EMISSIONS

Ключевые слова: машинное обучение, символьная регрессия, генетические алгоритмы оптимизации, выбросы, газотурбинные установки.

В настоящее время в области энергетики и газотурбинного машиностроения в России и за рубежом приобретают все большую актуальность проблемы экологического мониторинга, повышение надежности и эффективности систем контроля выбросов для газотурбинных установок. Утилизация попутных нефтяных газов с использованием газовых турбин малой мощности [2, 3], воссоздание отечественного производства газовых турбин большой мощности [4] поднимают на новый уровень вопросы, касающиеся не только измерения и контроля фактических выбросов вредных веществ в окружающую среду [1, 5], но и прогнозирования интенсивности таких выбросов.

В продуктах сгорания газа основными токсичными веществами являются оксиды азота (для них будет использоваться обозначение  $\text{NO}_x$  как суммарное количество монооксида азота  $\text{NO}$  и диоксида азота  $\text{NO}_2$ ), из продуктов неполного сгорания обычно выделяют: оксид углерода ( $\text{CO}$ ), углеводороды, альдегиды, сажу. В странах Европейского союза согласно директиве о промышленных выбросах [6], которая вступила в силу в 2016 году, концентрации газов  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$  должны непрерывно измеряться для каждой установки сжигания, превышающей общую мощность 100 МВт. Системы прогнозного мониторинга выбросов являются важными инструментами для проверки и поддержки дорогостоящих систем непрерывного мониторинга выбросов, применяемых на газотурбинных электростанциях. Для построения систем прогнозного мониторинга необходимы соответствующие экологически достоверные данные.

РИС. 1. Схема расположения датчиков, фиксирующих значения входных и выходных переменных для набора данных



## ФАКТЫ

# 36 733

последовательности  
переменных охватывают  
данные, использованные  
для построения модели

Для построения модели был использован открытый набор данных из репозитория Калифорнийского университета [7]. Данные охватывают 5 лет (с 2011 по 2015 гг.) и включают в себя 36 733 последовательности переменных. На рисунке 1 показана схема расположения датчиков, фиксирующих значения входных и выходных переменных.

Собранные данные содержат среднечасовые измерения девяти входных параметров, из которых можно выделить три переменные, характеризующие состояние окружающей среды, 6 переменных, характеризующих технологический процесс, и два целевых показателя – объемы выбросов  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ . Подробно контролируемые переменные приведены в таблице 1. В работе [8] был дан первоначальный статистический анализ данных, исследованы параметры нейронной сети, построенной на основе ELM (Extreme Learning Machines), приведены результаты, полученные для этой модели, и модели на основе алгоритма случайного леса (RF, Random Forest). Авторы используют два показателя качества моделей – модуль среднего отклонения (MAE) и коэффициент детерминации ( $R^2$ ). Лучшие из полученных в работе [8] модели имеют  $\text{MAE} = 0,97$ ,  $R^2 = 0,56$  для выбросов  $\text{CO}$  и  $\text{MAE} = 4,57$ ,  $R^2 = 0,67$  для выбросов  $\text{NO}_x$ . Представленный набор данных послужил стимулом исследовать другие методы машинного обучения и попробовать получить модели с лучшими прогнозными качествами.

Особенностью данного набора данных является достаточно длительный срок сбора данных – 5 лет.

ТАБЛИЦА 1. Набор переменных для построения моделей

Переменная	Аббревиатура	Единицы измерений
Температура внешней среды	AT	°C
Давление внешней среды	AP	бар
Влажность внешней среды	AN	(%)
Перепад давления в воздушном фильтре	AFDP	бар
Давление выхлопа газовой турбины	GTEP	бар
Температура на входе в турбину	TIT	°C
Температура на выходе из турбины	TAT	°C
Выработка энергии турбиной	TEY	МВт
Давление на выходе из компрессора	CDP	бар
Оксид углерода	CO	мг/м <sup>3</sup>
Оксид азота	NO <sub>x</sub>	мг/м <sup>3</sup>

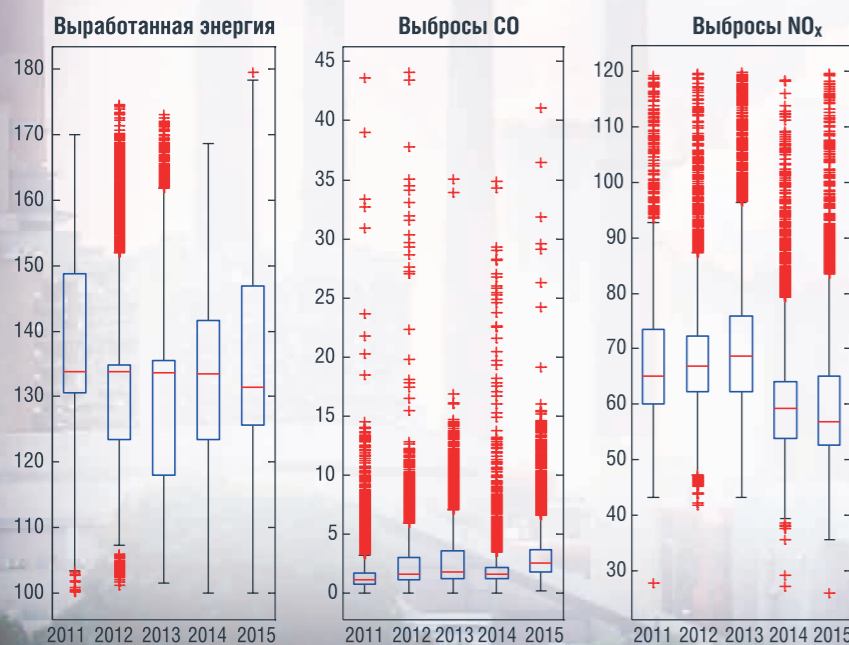
На протяжении этого времени неоднократно проводилось профилактическое обслуживание или ремонт оборудования, могли существенно измениться технологические режимы работы турбины. Поэтому был поставлен вопрос о проведении анализа данных, с тем чтобы установить наличие существенных изменений статистических характеристик каждого показателя. На рисунке 2 приведены 3 графика boxplot для выработанной энергии и выбросов CO и NO<sub>x</sub> по годам. Горизонтальная красная линия соответствует медианному значению, горизонтальные синие линии показывают нижний (25%) и верхний (75%) квартили. Из приведенных графиков можно увидеть, что в 2014–2015 гг. произошло снижение выбросов оксида азота, причем это снижение не может быть объяснено уменьшением выработки энергии. Поэтому был сделан вывод, что для исследования моделей прогноза выбросов NO<sub>x</sub> следует разделить набор данных и исследовать результаты, обучая и тестируя модели отдельно на данных 2011–2013 гг. и на данных 2014–2015 гг.

**ФАКТЫ**

**5** лет

срок сбора данных

РИС. 2. Графики boxplot для произведенной энергии и выбросов оксида углерода и азота



На графиках на рисунке 2 красными маркерами отмечены резко выделяющиеся, как в большую, так и в меньшую сторону, значения наблюдений. Выбросы оксида углерода в ряде случаев могут увеличиваться в десятки раз по сравнению с медианным значением. Объем выбросов оксида азота больше по абсолютной величине, их максимальное увеличение превышает медианное значение в 1,5–2 раза. Был проведен анализ соответствующих технологических параметров, чтобы исключить возможные ошибки в измерении или фиксации значений переменных, так как в исследуемой задаче наибольшую важность имеет правильное предсказание именно резкого роста выбросов CO и NO<sub>x</sub>. Анализ показал, что резкий рост выбросов связан с изменением параметров технологического процесса, набор данных не содержит грубых ошибок, которые должны быть исключены при работе с данными.

Для прогнозирования были построены три модели: на основе алгоритмов случайного леса, градиентного бустинга и нечеткой нейронной сети. Предлагаемые подходы позволили сократить среднюю ошибку прогноза для выбросов NO<sub>x</sub> до MAE = 2,91, R<sup>2</sup> = 0,82.

Следует отметить, что модели, построенные в результате применения большинства методов машинного обучения, представляют собой некий «черный ящик» – получаемые зависимости не являются прозрачными, обработка большого объема данных не приводит к формулировке закономерностей в аналитическом виде, периодически у специалистов-технологов возникают вопросы об интерпретации результатов построения моделей. Чтобы получить более прозрачный результат, было решено построить модель на основе метода символьной регрессии. Преимуществом этого метода является возможность получить модель в виде аналитической зависимости, причем вид зависимости определяется непосредственно в ходе работы генетического алгоритма. К недостаткам метода следует отнести долгое время работы алгоритма в случае большого числа входных переменных, необходимость экспериментов с выбором настроечных параметров.

ТАБЛИЦА 2

Традиционная (инфиксная) запись	Постфиксная запись выражения
$F_1 = 2,8 \cdot x_1 + 1,6 \cdot x_2 \cdot (exp(x_1) - x_3)$	$2,8 x_1 + 1,6 x_2 \cdot x_1 exp x_3 - \cdot +$
$F_2 = 25,1 \cdot x_1 \cdot x_2 - 60,3 \cdot x_3 \cdot (x_4 - 2)^2$	$25,1 x_1 \cdot x_2 \cdot 60,3 x_3 \cdot x_4 2 - 2 \wedge \cdot -$

ТАБЛИЦА 3

Родители	Потомки
$2,8 x_1 + 1,6 x_2 \cdot x_1 exp x_3 - \cdot +$	$2,8 x_1 \cdot 1,6 x_2 \cdot x_4 2 - 2 \wedge \cdot -$
$25,1 x_1 \cdot x_2 \cdot 60,3 x_3 \cdot x_4 2 - 2 \wedge \cdot -$	$25,1 x_1 \cdot x_2 \cdot 60,3 x_3 \cdot x_1 exp x_3 - \cdot +$

Символьная регрессия оказалась эффективным методом решения ряда задач, согласно публикациям зарубежных авторов [9, 10, 11], но пока не нашла широкого применения для решения задач нефтегазовой отрасли в России. Построение символьной регрессии основывается на методологии генетических алгоритмов. Аналитическая зависимость представляется как хромосома, формируемая из набора генов, в который входят переменные, арифметические операции, функции, константы. Любую аналитическую зависимость можно представить в форме постфиксной записи, когда операнды расположены перед знаками операций. Такая форма представления позволяет избежать использования скобок в выражении. Выражение читается слева направо, когда в выражении встречается знак операции, выполняется соответствующая операция над двумя последними операндами. В таблице 2 приведен пример двух выражений в традиционной форме и в постфиксной записи.

Чтобы получить аналитическое выражение, наилучшим образом соответствующее имеющимся данным, на начальном этапе определяется набор генов (в рассматриваемом примере в него были включены операции сложения, вычитания, умножения, деления, возведения в степень, унарный минус, экспонента, логарифмическая функция, набор переменных  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , случайные числа), из набора генов случайным образом формируется популяция хромосом. Для каждой хромосомы для всего набора данных обучающей выборки определяется функция приспособленности  $G$  как сумма квадратов отклонений, рассчитанных по этой формуле значений от известных значений целевой переменной:

$$G_j = - \sum_{i=1}^n (F_j(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}) - y_i)^2, \quad (1)$$

где  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}$  – значения объясняющих переменных для  $i$ -ой записи обучающей выборки,  $y_i$  – известное значение целевой переменной для  $i$ -ой записи обучающей выборки,  $n$  – объем обучающей выборки,  $j$  – номер хромосомы.

В соответствии с эволюционным принципом выживания наиболее приспособленных особей, с помощью функции  $G$  определяется степень приспособленности конкретных особей в популяции, что позволяет выбрать из них наиболее приспособленные (т.е. имеющие максимальные значения функции приспособленности).

**ФАКТЫ**

**Символьная регрессия**

– метод, позволяющий получить более прозрачный результат

Поскольку при решении задачи должны быть получены минимальные отклонения расчетных значений от известных, перед знаком суммы необходим знак «-».

Далее реализуется этап селекции (выбор из хромосом особей-родителей) и этап скрещивания (другое название – кроссовер) – для двух хромосом-родителей определяется точка разрыва и формируются две новые хромосомы-потомки, содержащие фрагменты каждого из родителей. Пример операции скрещивания приведен в таблице 3.

Таким образом, в результате скрещивания будут получены новые хромосомы-формулы, которые в традиционной записи имеют вид:

$$FF_1 = 2,8 \cdot x_1 + 1,6 \cdot x_2 \cdot (x_4 - 2)^2$$

$$FF_2 = 25,1 \cdot x_1 \cdot x_2 + 60,3 \cdot x_3 \cdot (exp(x_1) - x_3)$$

Следующий шаг генетического алгоритма – операция мутации – состоит в том, что с некоторой вероятностью может произойти изменение случайного выбранного в хромосоме гена, например, любая арифметическая операция в выражении может быть заменена на другую арифметическую операцию или переменная может быть заменена на другую переменную. Пример применения операции мутации к потомкам  $FF_1$  и  $FF_2$  показан ниже.

$$FFm_1 = 2,8 \cdot x_1 - 1,6 \cdot x_2 \cdot (x_4 - 2)^2$$

$$FFm_2 = 25,1 \cdot x_1 \cdot x_2 + 60,3 \cdot x_3 \cdot (exp(x_2) - x_3)$$

Далее вычисляются функции приспособленности  $G_j$  для новых хромосом и формируется новая популяция, которая включает в себя часть поколения родителей и потомков с лучшими значениями функции приспособленности. Описанная процедура повторяется до тех пор, пока не будет сформировано заранее определенное число поколений или пока не наступит схождение популяции – состояние популяции, когда ни операция кроссовера, ни операция мутации в течение нескольких поколений не вносят изменений в генетическое разнообразие популяции. В качестве решения задачи выбирается особь с лучшим значением функции приспособленности из последней популяции. Подробно описание генетического алгоритма, видов селекции и других особенностей

применения метода можно найти в [12, 13, 14]. Для приведения объясняющих переменных к безразмерному виду и выравнивания масштаба изменения признаков была использована процедура стандартизации

$$x_{st\ i,j} = \frac{x_{i,j} - \bar{x}_i}{\sigma_{x_i}}$$

где  $x_{st\ i,j}$  – стандартизованное значение  $i$ -ого признака;  $\bar{x}_i$  – среднее значение  $i$ -го признака, вычисленное по обучающей выборке;  $\sigma_{x_i}$  – стандартное отклонение для  $i$ -го признака, вычисленное по обучающей выборке.

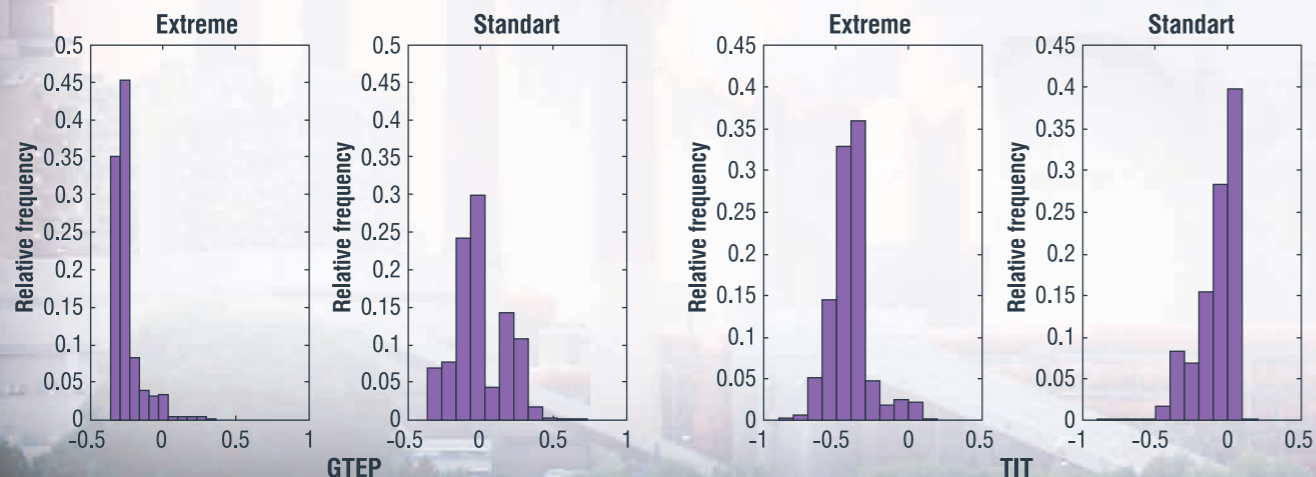
Показатели качества полученной с применением символьной регрессии модели для прогнозирования выбросов СО примерно соответствовали представленным в работе [8]. Для улучшения качества модели прогноза выбросов СО было принято решение построить модель выбросов для режимов, близких к стандартным (при которых выбросы не превышают 4 мг/м<sup>3</sup>) и для режимов, приводящих к экстремальным значениям выбросов (более 4 мг/м<sup>3</sup>), а для определения ситуаций, приводящих к экстремально высоким выбросам СО, построить классификационную модель. Формулы, полученные с помощью генетических алгоритмов, для прогноза объема выбросов СО для стандартных  $F_{st}$  и экстремальных  $F_{extr}$  режимов показаны ниже:

$$F_{extr} = 225,59 \cdot GTEP^2 \cdot TAT - 20,67 \cdot TAT \cdot \exp(-TIT) - 20,67 \cdot AFDP \cdot TIT + 7,88 \times GTEP \cdot \exp(-TIT^2) - 67,05 \cdot AT \cdot AFDP \cdot TIT - 24,68 \cdot AT \cdot TIT \cdot \exp(-TAT) - 68,81 \cdot AFDP \cdot GTEP \cdot TIT \cdot \exp(-GTEP) + 7,25. \quad (2)$$

$$F_{st} = -2,46 \cdot AT - 2,46 \cdot AH + 4,93 \cdot GTEP - 4,77 \cdot TIT - 4,77 \cdot TAT + 2,46 \cdot TEY - 4,92 \cdot \exp(-TAT) + 3,15 \cdot \exp(-GTEP - TEY) + 4,93 \cdot AFDP \cdot (AT + AH) + 1,76 \cdot \exp(-2,0 \cdot TEY) \cdot (AT + AH) + 3,33.$$

При построении классификационной модели алгоритм по значениям входных переменных определяет ситуацию как приводящую к экстремальным выбросам или к стандартным. Следует отметить, что классы достаточно сильно отличаются по объему – к экстремальным может быть отнесено примерно 10% имеющихся в распоряжении данных. Четкое разграничение на два класса в рассматриваемом случае имеет серьезный недостаток – набор входных переменных, для которого зафиксировано значение выброса СО 3,95 мг/м<sup>3</sup>, попадает в класс стандартных

РИС. 3. Гистограмма нормированных значений входных переменных GTEP и TIT для наборов данных, отнесенных к стандартному и экстремальному классам



### ФАКТЫ

**10** %

имеющихся в распоряжении данных можно отнести к экстремальным

выбросов, а набор переменных, для которого зафиксировано значение выброса СО 4,05 мг/м<sup>3</sup>, должен быть отнесен к классу экстремальных выбросов. Этот недостаток можно преодолеть, используя методологию нечеткой логики. Основные ее положения представлены в работах [15, 16], примеры применения методов нечеткой логики к решению ряда задач нефтегазовой отрасли можно найти в [17]. При нечеткой классификации степень принадлежности каждому классу  $\mu_{st}$  и  $\mu_{extr}$  может быть определена числом от 0 до 1.

Для построения нечеткой классификационной модели необходим набор правил, согласно которым по значениям входных переменных будут определены степени принадлежности каждому классу. Анализ входных переменных для наборов данных, отнесенных к разным классам (гистограммы значений переменных GTEP и TIT приведены на рисунке 3), показал, что для разных классов существуют достаточно широкие перекрывающиеся интервалы значений переменных.

Для показанных на рисунке 3 переменных правила для модели нечеткой классификации могут быть сформулированы следующим образом:

- если давление GTEP «Низкое», то класс «Экстремальный»,
- если температура TIT не «Высокая», то класс «Экстремальный».

Всего было сформулировано 6 правил: в качестве предикторов рассматривались входные переменные и их комбинации,

определенные в ходе процедуры символьной регрессии, представленные в формуле (2). То есть для экстремального класса был проведен анализ комбинаций  $GTEP^2 \cdot TAT$ ,  $TET \cdot \exp(TIT)$ ,  $AFDP \cdot TIT$  и других слагаемых, которые входят в формулу (2) для определения экстремальных выбросов. Таким образом, для каждого набора входных данных будут вычислены значения  $m_i$  (где  $i$  соответствует номеру правила), определяющие степень принадлежности комбинации входных значений классу экстремальных или стандартных выбросов. Влияние разных входных переменных нельзя считать в равной степени значимым, следовательно, для каждого правила должен быть введен весовой коэффициент  $w_i$ , определяющий вклад правила в принятие верного решения. Итоговое значение степени принадлежности каждому классу будет определено как

$$\mu_{st} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{st\ i} \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \mu_{extr} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{extr\ i} \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (3)$$

где  $m_{st\ i}$ ,  $m_{extr\ i}$  – значение функции принадлежности соответствующему классу для вектора входных данных в  $i$ -ом правиле,  $k$  – число правил,  $w_i$  – вес  $i$ -го правила.

Разделение на терми «Низкое» и «Высокое» значений каждого параметра, входящего в правило, и определение веса  $w_i$  соответствующего правила происходит в результате решения оптимизационной задачи. Для выделения термов переменной, влияющей на отнесение набора данных к классу «Стандартный» или «Экстремальный», необходимо определить значения параметров  $A$  и  $B$  функций принадлежности (параметры показаны на рисунке 4), которые задают разделение значений переменной на нечеткие подмножества.

Качество классификационной модели может быть определено показателем  $F$ -мера  $F_1$ :

$$F_1 = 2 \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}, \quad (4)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

где  $TP$  – число наборов входных данных, для которых верно определен класс «Стандартный»;  $FP$  – число наборов входных данных, которые отнесены к классу «Стандартный», но принадлежат классу «Экстремальный»;  $FN$  – число наборов входных данных, которые отнесены к классу «Экстремальный», но принадлежат классу «Стандартный».

При подсчете значений  $TP$ ,  $FP$ ,  $FN$  для обучающей и тестовой выборки набор входных переменных считался принадлежащим экстремальному классу, если степень принадлежности  $\mu_{extr}$  имела значение не ниже 0,5.

Таким образом, необходимо определить значения параметров  $A_i$ ,  $B_i$  и весовых коэффициентов  $w_i$  для каждого правила, которые обеспечивают максимум показателя  $F_1$  для обучающей выборки при соблюдении ограничений

$$\min(X_i) \leq A_i, \quad A_i < B_i, \quad B_i \leq \max(X_i), \quad 0 \leq w_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, k, \quad (5)$$

где  $X_i$  – нормированные значения входной переменной или комбинации входных переменных, входящей в  $i$  правило,  $k$  – число правил.

РИС. 4. Разделение на терми «Низкое» и «Высокое» для переменной GTEP

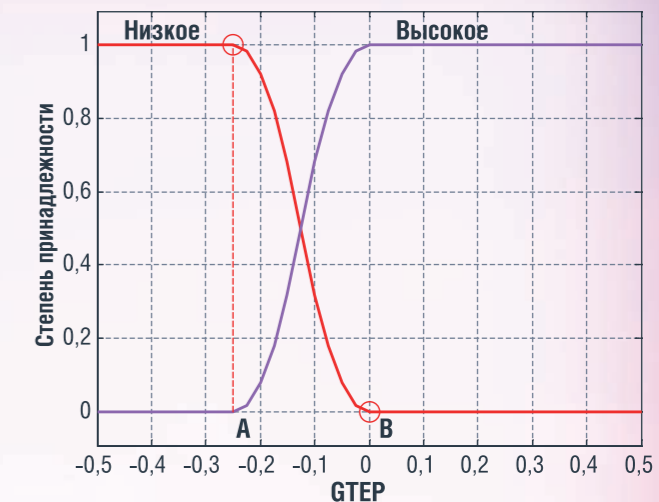
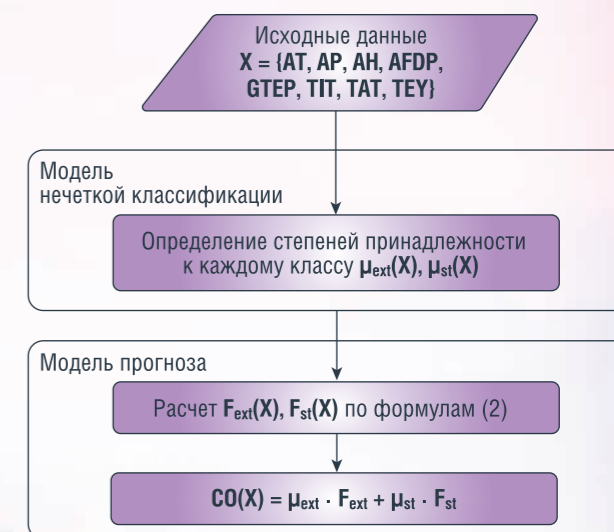


РИС. 5. Блок-схема расчета прогноза объема выбросов СО с применением нечеткой классификационной модели



### ФАКТЫ

**0 1**

от 0 до 1 может быть определена степень принадлежности каждому классу  $\mu_{st}$  и  $\mu_{extr}$  при нечеткой классификации

Для решения этой задачи был использован генетический алгоритм многомерной оптимизации. В этом случае в качестве генов рассматриваются значения параметров  $A_i$ ,  $B_i$  и весовых коэффициентов  $w_i$ ,  $i = 1, \dots, k$ , их сочетание формирует хромосому, в качестве функции приспособленности используется  $F$ -мера  $F_1$ . Таким образом был получен набор параметров системы нечеткого вывода, который обеспечивает максимальное значение  $F$ -меры  $F_1$  для обучающей выборки, с его помощью можно определить степени принадлежности  $\mu_{st}$ ,  $\mu_{extr}$  каждому из классов для любых значений входных переменных. Взаимодействие разработанных моделей представлено на блок-схеме на рисунке 5.

Метрики качества полученной модели для прогноза выбросов CO: MAE = 0,27 мг/м<sup>3</sup>, R<sup>2</sup> = 0,89 значительно превосходят приведенные в работе [8]. Следует отметить, что работа велась со среднечасовыми измерениями, увеличение частоты сбора параметров позволит улучшить качество прогноза.

## Заключение

На основе анализа большого объема фактических данных из открытого источника [7] построены модели на основе метода символьной регрессии для прогноза объема выбросов NO<sub>x</sub> и CO по значениям параметров окружающей среды и технологического процесса. Традиционные модели анализа данных для построения прогнозных моделей предполагают исследование эффективности применения отдельных методов машинного обучения (например, алгоритма случайного леса, градиентного бустинга и др.) для имеющегося набора данных. Для получения моделей с хорошими прогнозными свойствами, основанных на большом объеме реальных данных, недостаточно выбрать единственный подходящий метод машинного обучения, необходим комплексный анализ данных и построение комплекса моделей, учитывающих особенности имеющегося набора данных и технологического процесса или объекта. Результаты анализа данных и реализации различных алгоритмов машинного обучения были представлены на конференциях [18, 19] и в статьях [20, 21].

В данной статье представлен оригинальный подход к комплексному использованию алгоритмов машинного обучения, включающий двухступенчатую процедуру, где на первом шаге применяется модель классификации, позволяющая качественно определить объем выбросов через нечеткие термины «Стандартный» или «Экстремальный», а на втором шаге с помощью моделей, полученных на основе процедуры символьной регрессии, определяется количественное значение объема выбросов CO.

В работе предложена нечеткая классификационная модель, которая определяет ситуации, приводящие к резкому увеличению выбросов CO. Для определения параметров функций принадлежности предложено использовать оптимизационную процедуру на основе генетического алгоритма.

Разработанные модели могут использоваться для контроля выбросов, выявления сбоев в работе датчиков, замеряющих соответствующие показатели, прогнозирования технологических режимов, приводящих к увеличению выбросов.

Представленная работа является одним из примеров эффективного использования методов интеллектуального анализа данных для решения актуальных задач нефтегазовой отрасли. К работе над такими задачами привлекаются студенты, обучающиеся на кафедре прикладной математики и компьютерного моделирования РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

В настоящее время на кафедре прорабатывается проект создания собственного репозитория открытых данных для исследований в области машинного обучения и анализа данных применительно к специфике задач нефтегазовой отрасли. ●

## Литература

1. ГОСТ Р ИСО 11042-1-2001 «Установки газотурбинные. Методы определения выбросов вредных веществ».
2. Теплоэнергетические установки малой мощности на низкпотенциальном топливе / Г.В. Демидов, С.А. Морозов, А.Н. Сабирзянов [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2014. – № 2. – С. 42–52.
3. Техно-экономические и экологические аспекты утилизации попутного нефтяного газа (программный комплекс) / П.М. Левшин, И.А. Мерициди, К.Х. Шотиди, П.Р. Халиков // Территория Нефтегаз. – 2011. – № 8. – С. 56–63.
4. Скубрий Е.В., Александров Ю.Д. Перспективы инновационного развития электроэнергетики России // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2018. № 1. С. 80–85.
5. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Повышение надежности, энергетической и экологической эффективности систем газоочистки на ТЭС // Надежность и безопасность энергетики. 2018. № 4. С. 288–293.
6. Директива 2010/75/ЕС от 24 ноября 2010 года «О промышленных выбросах (о комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним)».
7. Gas turbine CO and NO<sub>x</sub> emission data set data set. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Gas+Turbine+CO+and+d+NOx+Emission+Data+Set> (дата обращения: 20.02.2022).
8. Kaya H., Tüfekci P., Uzun E. Predicting CO and NO<sub>x</sub> emissions from gas turbines: Novel data and a benchmark PEMS // Turkish journal of electrical engineering and computer sciences. 2019. № 27(6). P. 4783–4796.
9. Abooali, D., Khamehchi, E. Toward predictive models for estimation of bubble-point pressure and formation volume factor of crude oil using an intelligent approach. Braz. J. Chem. Eng. 2016, 33, 1083–1090.
10. Khan, S.H.; Kumari, A.; Dixit, G.; Majumder, C.B.; Arora, A. Thermodynamic modeling and correlations of CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, and N<sub>2</sub> hydrates with cage occupancies. J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2020, 10, 3689–3709. Computation 2021, 9, 139 16 of 16.
11. Praks, P.; Brkic, D. Symbolic Regression-Based Genetic Approximations of the Colebrook Equation for Flow Friction. Water 2018, 10, 1175.
12. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1996; p. 205.
13. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
14. Пантелеев А.В. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы / А.В. Пантелеев, Д.В. Метлицкая, Е.А. Алешина. – М.: Вузовская книга, 2013. – 244 с.
15. Zadeh L.A. Fuzzy logic and approximate reasoning. Synthese 1975, 30, 407–428.
16. Takagi T.; Sugeno, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Trans. Syst. Man Cybernet. 1985, 15, 116–132.
17. Иткин В.Ю., Кочуева О.Н. Методы нечеткой логики в задачах нефтегазовой отрасли [Электронный Ресурс]: Учебное Пособие. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021. – 2,41 Мб.
18. Кочуева О.Н. Применение методов машинного обучения для прогнозирования выбросов оксидов углерода и азота для газовых турбин / О.Н. Кочуева, К.Д. Никольский сборник трудов V Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в экосистеме современного образования», посвященная 150-летию со дня рождения академика И.М. Губкина, Москва, 2021, С. 49.
19. Кочуева О.Н. Контроль выбросов CO и NO<sub>x</sub> на производстве и анализ больших данных – новый стимул к развитию научно-исследовательских и образовательных программ / О.Н. Кочуева, Д.А. Эжаев, К.Д. Никольский, В.А. Цыганков // Решение Европейского союза о декарбонизации и новая парадигма развития топливно-энергетического комплекса России: Материалы международной научно-практической конференции, Казань, 31 августа – 1 сентября 2021 года. – Казань: Ихлас, 2021. – С. 259–262.
20. Kochueva O, Nikolskii K. Data Analysis and Symbolic Regression Models for Predicting CO and NO<sub>x</sub> Emissions from Gas Turbines. Computation. 2021; 9(12):139. <https://doi.org/10.3390/computation9120139>.
21. Цыганков В.А., Кочуева О.Н. Разработка моделей прогноза выбросов оксидов углерода и азота для газовых турбин на основе фактических данных / В.А. Цыганков, О.Н. Кочуева // Газовая промышленность. – 2021. – № S4 (825). – С. 122–125.

KEYWORDS: machine learning, symbolic regression, genetic optimization algorithms, emissions, gas turbine installations.

# Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»



## Кафедра ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ и КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

готовит специалистов в области математического и компьютерного моделирования, анализа данных, искусственного интеллекта

Основанная в 1970 году, Кафедра бережно хранит высокие стандарты обучения, поэтому ее выпускники являются признанными профессионалами, работают в ведущих научных центрах России и мира, занимают лидирующие позиции в нефтегазовых и IT-компаниях

**ОБУЧЕНИЕ ВЕДЕТСЯ В БАКАЛАВРИАТЕ** по направлению «Прикладная математика»

Профиль Математическое моделирование в технике и экономике

**ОБУЧЕНИЕ ВЕДЕТСЯ В МАГИСТРАТУРЕ** по направлениям «Прикладная математика»

Программа Анализ данных и компьютерное моделирование (вечерняя форма обучения)

Программа Математическое моделирование в нефтегазовой отрасли

**ОБУЧЕНИЕ ВЕДЕТСЯ В АСПИРАНТУРЕ** по специальностям

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

## БАЗОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ИЗУЧАЕМЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ

- фундаментальные и прикладные разделы современной математики и информатики
- современные методы математического и компьютерного моделирования сложных промышленных комплексов и систем
- анализ данных, машинное обучение и его приложения
- статистические методы обработки массивов данных
- технико-экономические подходы к эффективному управлению и обеспечению надежной работы сложных технических систем



## КОНТАКТЫ

119991, г. Москва,  
Ленинский проспект,  
дом 65, корпус 2  
+7 (499) 507-86-19  
pkm@gubkin.ru

Полная версия журнала  
доступна по подписке