

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.33;535.317:544.478

doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-60-71

## ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОЛОТЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОКИСИ УГЛЕРОДА В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Борис Григорьевич Вайнер**✉

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия  
boris-stmt@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4826-5150>

### Аннотация

В статье рассмотрены некоторые ключевые вопросы, связанные с применением автомобильных катализаторов, действие которых направлено на очистку выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания от окиси углерода при низкой стартовой температуре. Показано, что уровень каталитической активности таких твердотельных систем, как  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$ , можно успешно выявлять путем использования для этой цели современного высокопроизводительного матричного тепловидения (метода инфракрасной термографии).

Приведены результаты тепловизионного исследования гранулированных образцов  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  с высокоразвитой внутренней поверхностью носителя, на которую осаждены наночастицы золота, служащие для ускорения реакции окисления CO до  $\text{CO}_2$ . Поскольку первым этапом гетерогенного катализа в такой задаче является адсорбция молекул выхлопных газов на поверхности соприкосновения с наночастицами благородного металла, в эксперименте также наглядно продемонстрировано, что тепловизионный метод может служить высокоинформативным диагностическим инструментом, способным представительно отражать особенности протекания сорбционных процессов в твердотель-

ных структурах. Информативность тепловизионного тестирования многократно увеличивается при использовании многоячеечных библиотек экспериментальных образцов.

Приведены примеры двух разнотипных реакторов, совмещенных с матричной тепловизионной технологией, позволяющих проводить исследование гетерогенных каталитических систем в разных динамических режимах. С помощью тепловизионного метода наглядно представлено количественное различие особенностей кинетики сорбционного и каталитического процессов, протекающих последовательно друг за другом в системе  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  при низкой (комнатной) температуре.

Показано, что инфракрасная термография нового поколения способна служить высокоинформативным инструментом исследования каталитических систем, используемых совместно с двигателями внутреннего сгорания на автомобильном транспорте.

**Ключевые слова:** двигатель, выхлопные газы, окись углерода, катализатор, наночастицы золота, тепловизор, тепловидение, инфракрасная термография.

**Благодарности:** автор выражает благодарность Б.Л. Морозу за предоставление образцов катализатора для настоящих исследований, П.А. Пыряеву за проведение измерений на газоанализаторе ПЭМ-2М, А.А. Гузеву за исключительный вклад в создание реактора, изображенного на рис. 1 настоящей статьи.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, тема № FWGW-2025-0014.

*Ссылка для цитирования:*

Вайнер Б.Г. Тепловизионное исследование золотых катализаторов для нейтрализации окиси углерода в выхлопных газах автомобильных двигателей / Б.Г. Вайнер // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 4. – С. 60-71. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-60-71.

Original article

Open Access Article

# THERMAL IMAGING STUDY OF GOLD CATALYSTS FOR CARBON MONOXIDE NEUTRALIZATION IN EXHAUST GASES OF AUTOMOTIVE ENGINES

**Boris Grigorievich Vayner**<sup>✉</sup>

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia  
boris-stmt@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4826-5150>

## Abstract

The paper discusses some key issues related to the use of automotive catalysts, which are aimed at purifying the exhaust gases of internal combustion engines from carbon monoxide at a low starting temperature. It is shown that the level of catalytic activity of solid-state systems such as  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  can be successfully identified by using modern high-performance matrix thermal imaging (infrared thermography) for this purpose. There are results of a thermal imaging study of  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  granular samples with a highly developed inner surface of the carrier on which gold nanoparticles are deposited, which serve to accelerate the oxidation reaction of CO to  $\text{CO}_2$ . Since the first stage of heterogeneous catalysis in such a task is the adsorption of exhaust gas molecules on the contact surface with noble metal nanoparticles, the experiment also clearly showed that the thermal imaging method can serve as a highly informative diagnostic tool capa-

ble of representing the features of sorption processes in solid-state structures. The informative value of thermal imaging testing increases many times when using multicellular libraries of experimental samples. Examples of two different types of reactors combined with matrix thermal imaging technology are given, allowing the study of heterogeneous catalytic systems in different dynamic modes. Using the thermal imaging method, the quantitative difference is clearly presented between the kinetics of sorption and catalytic processes occurring sequentially in  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  system at low (room) temperature. It is shown that infrared thermography of a new generation can serve as a highly informative tool for the study of catalytic systems used together with internal combustion engines in road transport.

**Keywords:** engine, exhaust gases, carbon monoxide, catalyst, gold nanoparticles, thermal imager, thermal imaging, infrared thermography.

**Acknowledgements:** the author acknowledges B.L. Moroz for providing catalyst samples for the research, P.A. Pyryaev for making measurements on PEM-2M gas analyzer, A.A. Guzev for his contribution to the creation of the reactor shown in Fig. 1 of this paper.

**Funding:** The paper is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, no. FWGW-2025-0014.

## Reference for citing:

Vayner BG. Thermal imaging study of gold catalysts for carbon monoxide neutralization in exhaust gases of automotive engines. *Transport Engineering*. 2026;4:60-71. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-60-71.

## Введение

Проблема борьбы с вредными выбросами при эксплуатации автомобильного транспорта выступает сегодня на передний план. Особую важность она приобретает для больших городов и мегаполисов. Одним из веществ, наиболее значимых для состояния окружающей среды, содержащихся в автомобильных выхлопах, является окись углерода, которая образуется из-за неполного сгорания топлива при недостатке кислорода в этом процессе.

Незаменимыми помощниками в обеспечении чистоты атмосферы служат автомобильные катализаторы – функциональные высокотехнологичные материалы, устроенные так, что активный компонент (обычно – наночастицы благородных металлов) здесь

помещают на высокоразвитую поверхность твердых носителей, имеющую значительную эффективную площадь в пересчете на грамм вещества. В качестве таких носителей часто выступают окислы металлов, оформленные в виде гранул [1]. Однако, проигрывая стороной подобных каталитических систем является то, что удовлетворительно выполнять свои защитные функции они, как правило, начинают лишь по достижении высокой температуры после довольно продолжительной стартовой работы холодного двигателя. На начальном же этапе, в период разогрева, поллютанты выбрасываются из глушителя практически в неизменном виде, что наносит существенный вред экосистеме.

В связи с вышеизложенным, разработ-

ка и исследование новых катализаторов [2], позволяющих снизить уровень загрязнений окружающей среды при отведении отработанных газов от двигателя [1], в том числе, способных исполнять свои функции при низких температурах [3], а также разработка новых высокопроизводительных методов диагностики, дающих возможность оперативно определять и сравнивать друг с другом рабочие свойства каталитических материалов [4, 5], становятся крайне актуальными. Проведение соответствующих исследований особенно важно, когда оценка токсичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) осуществляется при условиях их работы, близких к реальной эксплуатации транспортного средства [6], в том числе в режиме пуска холодного двигателя.

Известным способом борьбы с отмеченным выше “высокотемпературным недочетом” платиновых и палладиевых систем служит введение золота в состав катализаторов, которое иногда комбинируют с платиной и палладием. В работе [7] золото было отмечено как наиболее эффективный катализатор для реакций окисления СО при низких температурах.

В исследованиях, выполненных под руководством Naguta [8-10 и др.], было обнаружено, что при осаждении наночастиц Au размером несколько нанометров на поверхность оксидных носителей ( $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.) происходит интенсивное окисление высокотоксичного СО до  $\text{CO}_2$ . На ряде носителей каталитическая активность материалов при этом катстрофически резко возрастала при размерах наночастиц  $< 4$  нм [10]. Такие катализаторы привлекли к себе внимание многих исследователей [11]. Уникальным свойством образцов оказалось то, что высокая эффективность по нейтрализации угарного газа у них сохраняется не только при комнатных, но даже при нулевых и отрицательных ( $-70$  °С) температурах [9, 10].

Это свойство представляет особую ценность для обеспечения экологической безопасности после холодного пуска автомобильных двигателей практически в любых географических широтах, включая районы Крайнего Севера. С учетом того, что золото дешевле платины и палладия, всесто-

роннее изучение свойств наночастиц этого металла в составе катализаторов для окисления монооксида углерода до углекислого газа вызывает немалый практический и экономический интерес.

Важность автомобильных каталитических конвертеров для защиты окружающей среды предопределяет серьезное отношение в литературе к разносторонним вопросам, связанным с этой проблемой [12]. Разрабатываются новые катализаторы [1], подробно изучаются и обсуждаются механизмы деактивации наполнителей каталитических систем при длительной эксплуатации транспортных средств и др. К примеру, исследования, проведенные в [13], показали, что частицы драгоценных металлов могут спекаться из-за продолжительного термического старения. Эффект спекания, приводящий к увеличению средних размеров наночастиц до уровня, превышающего десятки нанометров, способен, как упомянуто выше, привести к ощутимому снижению активности золотых катализаторов.

Защите окружающей среды косвенно способствует также развитие и совершенствование технологий извлечения отработанных драгоценных металлов из каталитических систем [14]. Ясно, что упрощение и удешевление этой процедуры приводит к более интенсивной замене отработанных каталитических узлов на новые при эксплуатации «возрастных» автомобилей. Близко к этой проблеме стоят и исследования, посвященные оценке уровня вредных выбросов, которые образуются при работе ДВС с изношенными цилиндро-поршневыми группами [6].

Определение активности катализаторов является неотъемлемой частью полного цикла их исследований, лежащих в русле практической эксплуатации автомобилей. Цель настоящей статьи – ознакомить читателей с пока еще не ставшим стандартным в автомобильной промышленности, но, как будет видно, крайне эффективным и высокоинформативным методом тестирования катализаторов – инфракрасной (ИК) термографией, более известной как тепловидение, обладающей по ряду свойств существенными преимуществами перед традиционными, к примеру – газоаналитическими [6], подхо-

дами к изучению этих необходимых для отрасли материалов. В качестве предмета настоящего исследования выбран золотой катализатор, нанесенный в виде наночастиц на зерна окиси алюминия, обладающие высокоразвитой внутренней поверхностью. Несмотря на известную значимость золотых

### Материалы, эксперименты и методы

Технология изготовления экспериментальных образцов, использованных в настоящей работе, подробно описана в [8, 11]. Носителем каталитически активного компонента (Au) служил оксид алюминия. Образцы Au/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, помещенные в разогретый термошкаф, прокачивали на воздухе, выдерживая при температуре 300...800 °С в течение 4 ч и получая при этом наночастицы металла в диапазоне средних размеров 2...8 нм с тенденцией –

### Тепловизионный метод исследования

Тепловизионные измерения получают все более широкое распространение в разных сферах человеческой деятельности и в научных исследованиях [18, 19]. Их главное преимущество перед термометрической, калориметрической и другими технологиями, решающими подобные задачи – возможность детальной визуализации поверхностного температурного поля. Благодаря компьютеризации тепловизионных камер тепловидение из чисто качественного переросло в количественный метод исследования, в связи с чем стало преимущественно называться инфракрасной (ИК) термографией.

Разнообразные процессы выделения и поглощения теплоты, сопровождающиеся температурными превращениями, характерны для нашей природы. Важнейшее место среди них занимает экзотермическое окисление «тихого убийцы» – окиси углерода:  $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ . В гетерогенном катализе соответствующая научная проблема является одной из наиболее актуальных и обсуждаемых [9, 10, 11, 20]. В силу выраженной экзотермичности реакции значения температуры здесь отражают скорость ее протекания, что дает возможность изучать и сравнивать друг с другом свойства катализаторов, участвующих в

катализаторов для окисления CO до CO<sub>2</sub>, изучение этой реакции тепловизионными методами в условиях, при которых реагенты не нагреты выше комнатной температуры, является пока еще крайне редким событием [15, 16].

чем выше температура прокалики, тем больше размер частиц благодаря эффекту спекания [17]. По информации от технологов, готовивших образцы, нанесенное золото было распределено между внешней и внутренней областями зерен оксида однородно, то есть, так называемый, корочковый эффект, характерный для многих типов наносимых на оксиды металлических катализаторов, отсутствовал.

окислительном процессе. Так как эта скорость зависит от многих параметров (пористость зерен катализатора, извилистость микроканалов и др.), применение ИК термографии в данной области следует потенциально рассматривать как универсальный диагностический подход, пригодный для экспериментального изучения подобных каталитических систем с вариацией не только динамических характеристик и химического состава потоков реакционной смеси, но также микроструктуры твердых компонент. При этом температура изучаемого слоя в его отдельных сечениях может служить измеряемым параметром при сравнительном анализе особенностей кинетики и эффективности протекания каталитической реакции [19].

Тепловизионный метод удобен и интересен тем, что может быть применен неинвазивно, не требуя внедрения термометрических датчиков во внутрь измеряемого слоя. Это позволяет получать экспериментальную информацию независимо от локальных условий, в которых протекает реакция (давление и скорость потока газа-реагента, влияние рассеивания потока самими датчиками и подводными проводками, теплоотвод по этим проводкам и пр.).

Современные тепловизоры, осна-

щенные матричными детекторами ИК излучения [18], характеризуются высоким быстродействием, пространственным и температурным разрешением, позволяя отображать поверхностное температурное поле за сотые и тысячные доли секунды с точностью 0,01 °С и лучше. Благодаря

### Экспериментальные стенды

Непрерывные серии двумерных термограмм объектов измерялись в виде термофильмов с помощью матричного тепловизора ТКВр-ИФП/СВИТ (разработчик и изготовитель ИФП СО РАН, г. Новосибирск, Россия), оснащенного охлаждаемым детектором ИК излучения на основе InAs, работающим в спектральном диапазоне 2,5...3,05 мкм и имеющим формат матрицы фоточувствительных элементов 128×128 [21, 23, 24]. Температурная чувствительность прибора составляла 0.03 °С, рабочая частота кадров – 100 термограмм в секунду. В исследованиях было использовано два типа реакторов, с помощью которых мы изучали взаимодействие твердых катализаторов с газовой смесью. Один из реакторов изображен на рис. 1. Его работа в составе измерительного стенда обсуждалась нами в [19].

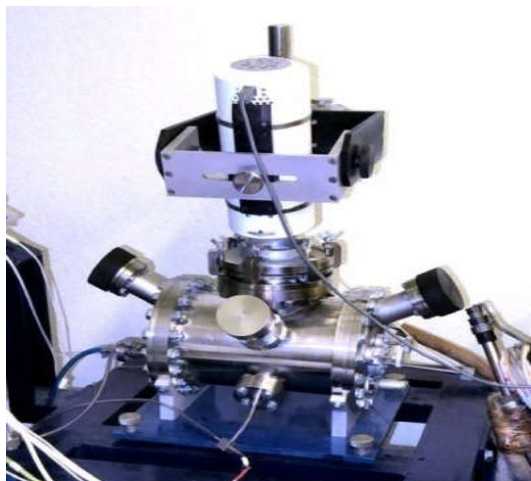


Рис. 1. Реактор с сапфировым окном (сверху) для пропускания теплового излучения, испускаемого экспериментальными образцами, установленными внутри. Над окном размещен матричный тепловизор ТКВр-ИФП/СВИТ

*Fig.1. The reactor with a sapphire window (on top) that allows thermal radiation emitted by the experimental samples to pass through. A TKVr-IFP/SVIT focal plane array (FPA)-based IR camera is mounted above the reactor window*

этому реализуются фантастические экспериментальные возможности: как если бы на интересующем участке поверхности были размещены отдельные высокоточные термометры, число которых превышало бы миллионы.

Другой, проточный, реактор и его приборное обрамление показаны на рис. 2.

Хорошо известным термодинамическим явлением, протекающим на твердой поверхности, является выделение и поглощение теплоты фазового перехода первого рода при адсорбции и десорбции молекул газа, соответственно. С помощью теоретических оценок, проведенных нами в [18, 21], было выявлено неожиданное свойство современной матричной тепловизионной техники. Оказалось, что метод ИК термографии способен обнаружить десятые, и даже сотые (!), доли монослоя молекул газа, адсорбированных на твердой поверхности. Это качество тепловидения предопределяет высокие перспективы для изучения с его помощью самых начальных стадий химических реакций, начиная с фазы их инициализации.

Наглядным примером, иллюстрирующим возможность привлечения тепловидения к изучению сорбционных свойств поверхности материалов, может служить рис. 3, на котором представлены термограммы, измеренные на образцах, помещенных в атмосферу водяного пара, при осаждении молекул H<sub>2</sub>O на гранулах поверхностно-активного сухого вещества, которым в данном случае служила навеска стирального порошка. Но этим примером полезные свойства ИК термографии применительно к рассматриваемой проблеме не ограничиваются. Ее принцип обзорности, позволяющий одновременно охватывать обширное поле изображения, используют в режиме анализа, так называемых, библиотек образцов. Библиотекой в этой области называют совокупность небольших ячеек, расположенных в одной плоскости, где в каждую помещают сыпучий образец (к примеру, катализатор), обладающий специфическими свойствами, вообще говоря, отличающимися от свойств образцов в соседних ячейках.

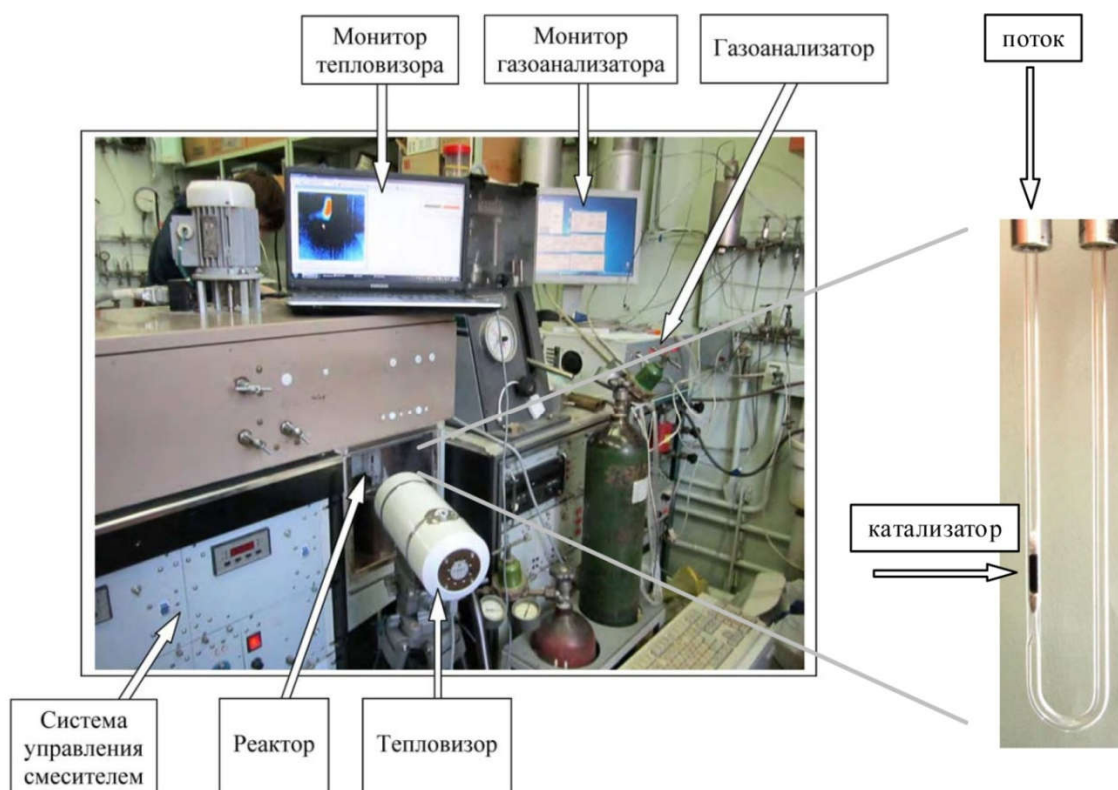


Рис. 2. Проточный трубчатый реактор с приборным обрамлением – экспериментальная установка, на которой проводилось совместное синхронное тепловизионное и газоаналитическое исследование образцов

*Fig.2. An experimental setup equipped with a flow-through tubular reactor where a joint synchronous infrared thermography (IRT) and gas analysis studies were performed*

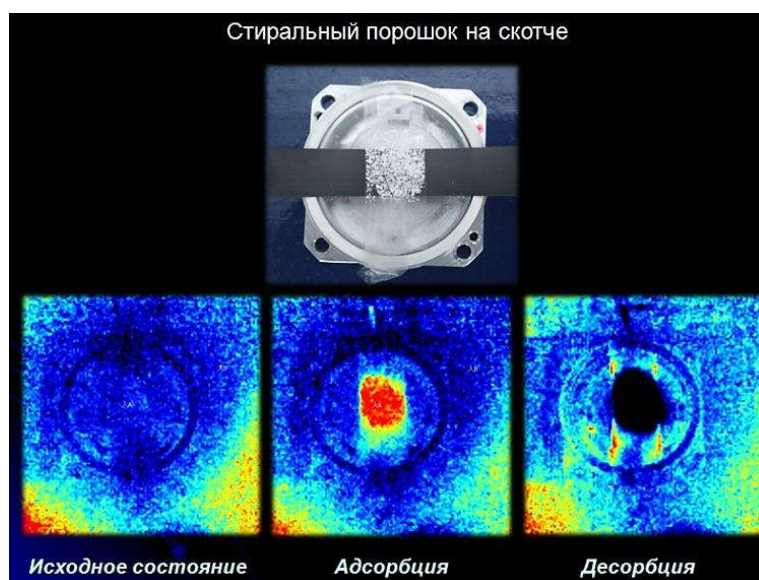


Рис. 3. Изображения, демонстрирующие протекание процессов адсорбции и десорбции молекул воды на поверхности зерен стирального порошка, закрепленного на скотче и размещенного в герметичном реакторе с окном, прозрачным в рабочем спектральном диапазоне используемого тепловизора. Сверху – фото, нижний ряд – серия тепловизионных термограмм, измеренных при поступлении водяного пара в реактор (нижний ряд, в середине) и при вакуумировании его объема (нижний ряд, справа)

*Fig. 3. Images representing the adsorption and desorption of water molecules on the surface of detergent granules secured on an adhesive tape placed in a sealed reactor equipped with a window transparent in the operating spectral range of the IR camera used. The top image is a photo, the bottom ones are a series of IR thermograms taken when a water vapor was introduced into the reactor (middle) and when the reactor's volume was evacuated (right)*

При этом появляется возможность количественно сравнивать тепловые эффекты во всех ячейках одновременно, обеспечив одинаковые экспериментальные условия [16, 22]. Такие системы, емкость которых достигает сотен образцов, часто используют для отбора наиболее эффективных реагентов (обычно – катализаторов), разрабатываемых преимущественно для промышленных целей. В работе [20] вышеописанная тепловизионная комбина-

торная технология была применена при исследовании каталитического окисления СО и позволила провести высокоинформативный скрининг и анализ библиотеки, содержащей 256 катализаторов, всего лишь за один час. При изучении свойств гранулированных материалов разной природы мы тоже активно используем вышеописанный комбинаторный подход. Иллюстрация одного из таких экспериментов приведена на рис. 4.

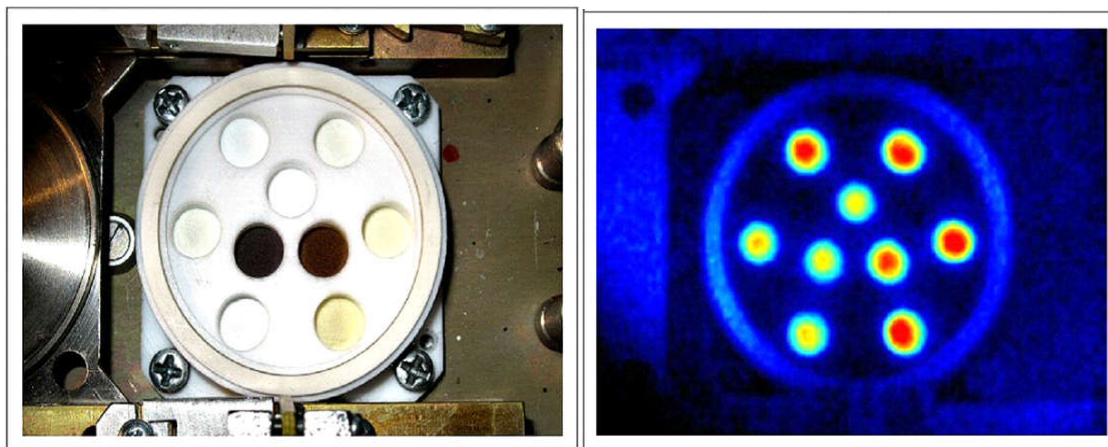


Рис. 4. Слева – фото библиотеки заполненной мелкогранулированными образцами разной физико-химической природы, размещенной в реакторе. Справа – соответствующая термограмма, полученная в один из моментов измерений с помощью матричного тепловизора и демонстрирующая разную сорбционную способность поверхности исследуемых структур

*Fig. 4. On the left is a photograph of a library filled with finely granulated samples of different physicochemical nature, placed in a reactor. On the right is the corresponding thermogram, obtained in the measurement process using an FPA-based IR camera TKVr-IFP/SVIT, demonstrating different adsorption capacities of the surfaces under stud*

## Результаты

Наглядный результат, полученный в едином эксперименте, демонстрирующий на одних и тех же образцах сразу два последовательных процесса – адсорбцию и катализ – представлен на рис. 5. График построен с использованием оцифрованных данных непрерывно записанного с частотой 100 термограмм в секунду термофильма, измеренного тепловизором ТКВр-ИФП/СВИТ. Рис. 5 интересен тем, что он один наглядно демонстрирует фундаментальные количественные различия тепловых эффектов, сопровождающих сорбцию и каталитический процесс.

Когда реактор находится под вакуумом, температура обоих образцов низкая и практически одинаковая (небольшое расхождение обусловлено остаточным эффектом, сохранившимся от предыдущего экс-

перимента). Когда в реактор вводится атмосферный воздух (21 °С, относительная влажность 60%), на структурах наблюдается повышение температуры из-за адсорбции молекул воды, присутствующих в атмосфере. Важно, что для обоих материалов – катализатора  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  и чистого носителя  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  – величина данного теплового эффекта практически одинаковая. Эта часть графика явно свидетельствует в пользу почти полной идентичности адсорбционных свойств поверхностей их гранул по отношению к воде.

Замена атмосферного воздуха сухой смесью  $\text{N}_2+\text{O}_2+\text{CO}$  (правая половина графика на рис. 5) резко изменяет тепловую картину библиотеки. Видно, что температура чистого носителя уменьшается, а температура катализатора демонстрирует

кардинально отличающееся поведение при напуске CO и кислорода в камеру: его температура резко повышается и затем продолжает увеличиваться, но несколько медленнее.

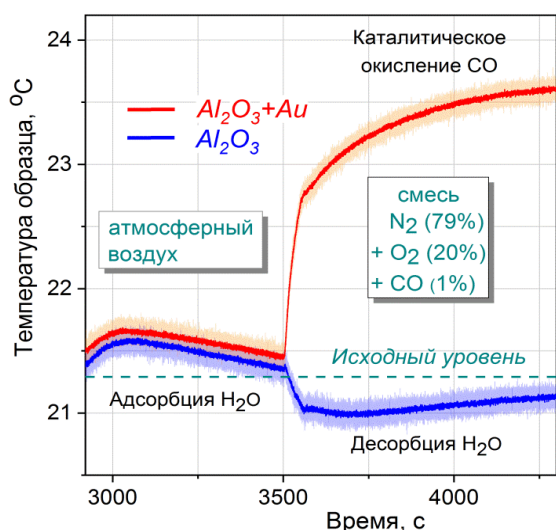


Рис. 5. Кардинальные различия тепловых проявлений в процессах сорбции и катализа на поверхности образцов  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  и на одном лишь носителе  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Последовательно во времени реализованы два режима: атмосферный воздух вводится в изначально вакуумированный реактор, после чего (начиная с 3500 с) замещается сухой газовой смесью указанного на поле графика состава

*Fig. 5. Fundamental differences in the thermal manifestations of sorption and catalytic processes on the surfaces of  $\text{Au}+\text{Al}_2\text{O}_3$  catalyst and on a  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  support. Two different conditions are implemented sequentially: atmospheric air is introduced into an initially evacuated reactor, and then (starting from 3500 seconds) it is replaced by a dry gas mixture with the composition indicated in the graph*

Может возникнуть вопрос: почему температура носителя ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) падает в начальный временной период после подачи смеси  $\text{N}_2+\text{O}_2+\text{CO}$ ? Ответ довольно прост. Когда внутренний объем реактора освобождается от атмосферного воздуха, молекулы адсорбированной воды срываются с поверхности образцов и выносятся наружу, что влечет за собой охлаждение за счет десорбции. Понятно, что подобный эффект имеет место и на образцах катализатора, но высокая каталитическая активность здесь настолько доминирует, что эффект десорбционного охлаждения просто теряется в таком чрезвычайно экзотермическом процессе.

С помощью рис. 5 удается языком термодинамики описать и “рассмотреть” кардинальное различие сорбционных и каталитических процессов. Данный рисунок служит элегантно демонстрацией того, как количественная ИК термография позволяет распознать и отделить друг от друга сорбционный и каталитический эффекты в физико-химических исследованиях.

На рис. 6 приведены результаты сопоставления тепловизионных данных, полученных на двух 4-ячеечных библиотеках при их последовательной загрузке в реактор, изображенный на рис. 1, и данных по последовательному (друг за другом) измерению каталитической активности всех этих восьми образцов (в единицах конверсии) газоаналитическим методом, являющимся «золотым стандартом» для подобных исследований.

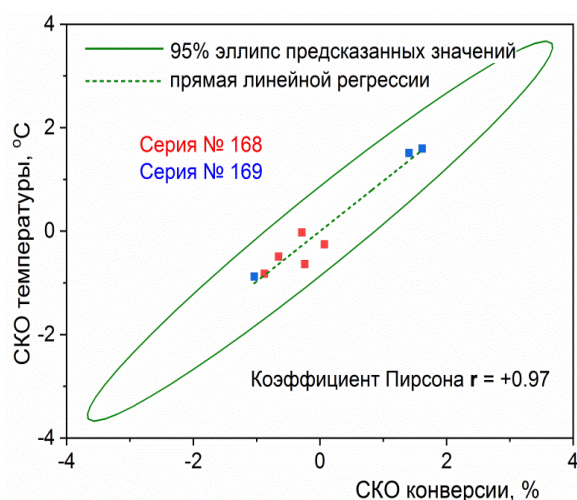


Рис. 6. Статистическое сопоставление тепловизионных (ось ординат) и газоаналитических (ось абсцисс) результатов измерений двух серий (№№ 168 и 169) катализатора  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$ . Экспериментальные точки соответствуют разным средним размерам наночастиц золота.

СКО – среднеквадратическое отклонение  
*Fig. 6. A statistical comparison of the results of IRT (ordinate axis) and gas analysis (abscissa axis) measurements of two series (Nos. 168 and 169) of the  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3+\text{Au}$  catalysts. The experimental points correspond to different average sizes of gold nanoparticles. Mean square deviation units are shown on the axes*

Видно, что данные, полученные двумя независимыми способами, хорошо соответствуют друг другу. Последнее подтверждается тем, что коэффициент корреляции Пирсона при таком сравнении бли-

зок к единице, а все экспериментальные точки лежат внутри 95-процентного эллипса предсказанных значений. Полученный и представленный на рис. 6 важный результат является весомым аргументом в

### Обсуждение/Заключение

В настоящей статье представлены материалы, демонстрирующие возможность применения метода современной ИК термографии при изучении катализаторов, разрабатываемых для использования в автомобильных каталитических системах. Выигрышной стороной тепловизионного метода перед существующими является высокая температурная чувствительность (порядка 0,01 °С) при скорости записи двумерных тепловых полей порядка 100 Гц, а также возможность тестирования одновременно целой серии образцов в одинаковых экспериментальных условиях, что позволяет проводить динамические измерения с получением информации, недоступной традиционным методам исследования.

Основной акцент в работе сделан на каталитическом окислении CO до CO<sub>2</sub> на золотых наночастицах при комнатной тем-

пературе. Продемонстрировано кардинальное количественное различие в тепловых проявлениях адсорбции молекул газа на золотых катализаторах, выполненных на основе  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и на тех же катализаторах в присутствии окиси углерода.

В экспериментах с синхронным использованием матричного тепловизора и газоанализатора ПЭМ-2М показано, что современная ИК термография способна претендовать на то, чтобы по мере дальнейшего развития стать полноценной заменой некоторым стандартным методам, предназначенным для определения каталитической активности твердотельных каталитических структур. Настоящая статья показывает, что физико-химические исследования, проводимые с применением ИК термографии нового поколения, могут послужить основой новой эры в экспериментальном катализе.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tan W, Xie S, Wang X, Wang C, Li Y, Shaw TE, Ma L, Ehrlich SN, Liu A, Ji J, Gao F, Dong L, Liu F. Highly efficient Pt catalyst on newly designed CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> support for catalytic removal of pollutants from vehicle exhaust. *Chemical Engineering Journal*. 2021;426: 131855. doi: 10.1016/j.cej.2021.131855.
2. Ras E-J, Rothenberg G. Heterogeneous catalyst discovery using 21st century tools: a tutorial. *RSC Advances*. 2014;4: 5963. doi: 10.1039/c3ra45852k.
3. Gatla S, Aubert D, Agostini G, Mathon O, Pascarelli S, Lunkenbein T, Willinger MG, Kaper H. Room-temperature CO oxidation catalyst: Low-temperature metal-support interaction between platinum nanoparticles and nanosized ceria. *ACS Catalysis*. 2016;6(9): 6151-6155. doi: 10.1021/acscatal.6b00677.
4. Bizreh YW, Al-Hamoud L, AL-Joubeh M. A study on the catalytic activity of new catalysts for removal of NO<sub>x</sub>, CH and CO emitted from car exhaust. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. 2014;16(1): 55-63. doi: 10.1016/j.jaubas.2013.06.001.
5. Ortega C, Otyuskaya D, Ras E-J, Virla LD, Patience GS, Dathe H. Experimental methods in chemical engineering: High throughput catalyst testing –HTCT. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021;99:1288-1306. <https://doi.org/10.1002/cjce.24089>
6. Gorlenko AO, Lukashova EV, Shets SP, Klenicheva AY. Influence of wear of internal combustion engine assemblies on toxicity parameters. *Transport engineering*. 2025;9: 46-51. doi: 10.30987/2782-5957-2025-9-46-51.
7. Choudhary TV, Goodman DW. Oxidation catalysis by supported gold nano-clusters. *Topics in Catalysis*. 2002;21(1): 25-34. doi: 10.1023/A:1020595713329.
8. Tsubota S, Haruta M, Kobayashi T, Ueda A, Nakahara Y. Preparation of highly dispersed gold on titanium and magnesium oxide. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 1991;63: 695-704. doi: 10.1016/S0167-2991(08)64634-0.
9. Haruta M, Yamada N, Kobayashi T, Iijima S. Gold catalysts prepared by coprecipitation for low-temperature oxidation of hydrogen and of carbon monoxide. *Journal of Catalysis*. 1989;115: 301-309. doi: 10.1016/0021-9517(89)90034-1.
10. Haruta M, Tsubota S, Kobayashi T, Kageyama H, Genet MJ. Low-temperature oxidation of CO over

- gold supported on TiO<sub>2</sub>, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. *Journal of Catalysis*. 1993;144: 175-192. doi: 10.1006/jcat.1993.1322.
11. Moroz BL, Pyrjaev PA, Zaikovskii VI, Bukhtiyarov VI. Nanodispersed Au/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for low-temperature CO oxidation: Results of research activity at the Boreskov Institute of Catalysis. *Catalysis Today*. 2009;144(3-4): 292-305. doi: 10.1016/j.cattod.2008.10.038.
  12. Kritsanaviparkorn E, Baena-Moreno FM, Reina TR. Catalytic converters for vehicle exhaust: fundamental aspects and technology overview for newcomers to the field. *Chemistry*. 2021;3(2): 630-646. doi: 10.3390/chemistry3020044.
  13. Bian L, Hu C, Cao Q. Structure characterization of aged automobile exhaust catalysts using electron probe microanalysis. *Analytica Chimica Acta*. 2024;1292: 342254. doi: 10.1016/j.aca.2024.342254.
  14. Xu B, Chen Y, Zhou Y, Zhang B, Liu G, Li Q, Yang Y, Jiang T. A review of recovery of palladium from the spent automobile catalysts. *Metals*. 2022;12: 533. doi: 10.3390/met12040533.
  15. Berkessel A, Ashkenazi E, Andreae MRM. Discovery of novel homogeneous rare earth catalysts by IR-thermography: epoxide opening with alcohols and Baeyer–Villiger oxidations with hydrogen peroxide. *Applied Catalysis A: General*. 2003;254(1): 27-34. doi: 10.1016/S0926-860X(03)00260-6.
  16. Vainer BG, Fast SS, Pyrjaev PA, Moroz BL. Phase transition- and catalytic chemical reaction-induced thermal manifestations in gas-solid heterogeneous systems monitored in real time using fast infrared thermography // XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2017) (Novosibirsk, Russia, June 26-30, 2017): Abstracts. – Novosibirsk: NIIC SB RAS, 2017. P. 318. ISBN 978-5-90168-841-0.
  17. Cao A, Lu R, Veser G. Stabilizing metal nanoparticles for heterogeneous catalysis. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2010;12: 13499. doi: 10.1039/c0cp00729c.
  18. Vainer BG. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment. *Journal of physics D: Applied Physics*. 2008;41: 065102. doi: 10.1088/0022-3727/41/6/065102.
  19. Vainer BG. Infrared thermography as a powerful, versatile and elegant research tool in chemistry: Principles and application to catalysis and adsorption. *ChemPlusChem*. 2020;85(7): 1438-1454. doi: 10.1002/cplu.202000202.
  20. Cypes S, Hagemeyer A, Hogan Z, Lesik A, Streukens G, Volpe AF Jr., Weinberg WH, Yaccato K. High throughput screening of low-temperature CO oxidation catalysts using IR thermography. *Combinatorial Chemistry and High Throughput Screening*. 2007;10: 25-35. doi: 10.2174/138620707779802788.
  21. Vainer BG. Quantitative characterization of vapour adsorption on solid surfaces and estimation of emissivity of solids using narrow-band short-wave infrared thermography. *Quantitative Infrared Thermography (QIRT Journal)*. 2008;5(2): 175-193. doi: 10.3166/qirt.5.175-193.
  22. Moates FC, Somani M, Annamalai J, Richardson JT, Luss D, Willson RC. Infrared thermographic screening of combinatorial libraries of heterogeneous catalysts. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1996;35: 4801-4803. doi: 10.1021/ie960476k.
  23. Vainer BG. Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3 μm operating wavelength // QIRT-2000 (Reims, France, July 18-21, 2000): Proceedings (Eds.: D. Balageas, J.-L. Beaudoin, G. Busse, G. M. Carlomagno). – Reims: UTAP URCA, 2000. P. 84-91. doi: 10.21611/qirt.2000.063.
  24. Kurishev GL, Kovchavtzev AP, Vainer BG, Guzev AA, Bazovkin VM, Stroganov AS, Subbotin IM, Zakharov IM, Efimov VM, Postnikov KO, Lee II, Valisheva NA, Panova ZV. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 1998;4: 5-10.

## REFERENCES

1. Tan W, Xie S, Wang X, Wang C, Li Y, Shaw TE, Ma L, Ehrlich SN, Liu A, Ji J, Gao F, Dong L, Liu F. Highly efficient Pt catalyst on newly designed CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> support for catalytic removal of pollutants from vehicle exhaust. *Chemical Engineering Journal*. 2021;426:131855. doi: 10.1016/j.cej.2021.131855.
2. Ras E-J, Rothenberg G. Heterogeneous catalyst discovery using 21st century tools: tutorial. *RSC Advances*. 2014;4:5963. doi: 10.1039/c3ra45852k.
3. Gatla S, Aubert D, Agostini G, Mathon O, Pascarelli S, Lunkenbein T, Willinger MG, Kaper H. Room-temperature CO oxidation catalyst: Low-temperature metal-support interaction between platinum nanoparticles and nanosized ceria. *ACS Catalysis*. 2016;6(9): 6151-6155. doi: 10.1021/acscatal.6b00677.
4. Bizreh YW, Al-Hamoud L, AL-Joubeh M. A study on the catalytic activity of new catalysts for removal of NO<sub>x</sub>, CH and CO emitted from car exhaust. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. 2014;16(1):55-63. doi: 10.1016/j.jaubas.2013.06.001.
5. Ortega C, Otyuskaya D, Ras E-J, Virla LD, Patience GS, Dathe H. Experimental methods in chemical engineering: High throughput catalyst testing –HTCT. *Canadian Journal of Chemical Engineering* [Internet]. 2021;99:1288-1306. Available from: <https://doi.org/10.1002/cjce.24089>
6. Gorlenko AO, Lukashova EV, Shets SP, Klenicheva AYU. Influence of wear of internal combustion engine assemblies on toxicity parameters. *Transport Engineering*. 2025;9:46-51. doi: 10.30987/2782-5957-2025-9-46-51.

7. Choudhary TV, Goodman DW. Oxidation catalysis by supported gold nano-clusters. *Topics in Catalysis*. 2002;21(1):25-34. doi: 10.1023/A:1020595713329.
8. Tsubota S, Haruta M, Kobayashi T, Ueda A, Nakahara Y. Preparation of highly dispersed gold on titanium and magnesium oxide. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 1991;63:695-704. doi: 10.1016/S0167-2991(08)64634-0.
9. Haruta M, Yamada N, Kobayashi T, Iijima S. Gold catalysts prepared by coprecipitation for low-temperature oxidation of hydrogen and of carbon monoxide. *Journal of Catalysis*. 1989;115:301-309. doi: 10.1016/0021-9517(89)90034-1.
10. Haruta M, Tsubota S, Kobayashi T, Kageyama H, Genet MJ. Low-temperature oxidation of CO over gold supported on TiO<sub>2</sub>,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. *Journal of Catalysis*. 1993;144:175-192. doi: 10.1006/jcat.1993.1322.
11. Moroz BL, Pyrjaev PA, Zaikovskii VI, Bukhtiyarov VI. Nanodispersed Au/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for low-temperature CO oxidation: Results of research activity at the Borekov Institute of Catalysis. *Catalysis Today*. 2009;144(3-4):292-305. doi: 10.1016/j.cattod.2008.10.038.
12. Kritsanaviparkporn E, Baena-Moreno FM, Reina TR. Catalytic converters for vehicle exhaust: fundamental aspects and technology overview for newcomers to the field. *Chemistry*. 2021;3(2):630-646. doi: 10.3390/chemistry3020044.
13. Bian L, Hu C, Cao Q. Structure characterization of aged automobile exhaust catalysts using electron probe microanalysis. *Analytica Chimica Acta*. 2024;1292:342254. doi: 10.1016/j.aca.2024.342254.
14. Xu B, Chen Y, Zhou Y, Zhang B, Liu G, Li Q, Yang Y, Jiang T. A review of recovery of palladium from the spent automobile catalysts. *Metals*. 2022;12:533. doi: 10.3390/met12040533.
15. Berkessel A, Ashkenazi E, Andreae MRM. Discovery of novel homogeneous rare earth catalysts by IR-thermography: epoxide opening with alcohols and Baeyer-Villiger oxidations with hydrogen peroxide. *Applied Catalysis A: General*. 2003;254(1):27-34. doi: 10.1016/S0926-860X(03)00260-6.
16. Vainer BG, Fast SS, Pyrjaev PA, Moroz BL. Phase transition- and catalytic chemical reaction-induced thermal manifestations in gas-solid heterogeneous systems monitored in real time using fast infrared thermography. *XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2017)*; 2017 June 26-30, Novosibirsk, Russia: NIIC SB RAS: 2017. p. 318.
17. Cao A, Lu R, Vesper G. Stabilizing metal nanoparticles for heterogeneous catalysis. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2010;12:13499. doi: 10.1039/c0cp00729c.
18. Vainer BG. Focal plane array based infrared thermography in fine physical experiment. *Journal of physics D: Applied Physics*. 2008;41:065102. doi: 10.1088/0022-3727/41/6/065102.
19. Vainer BG. Infrared thermography as a powerful, versatile and elegant research tool in chemistry: Principles and application to catalysis and adsorption. *ChemPlusChem*. 2020;85(7):1438-1454. doi: 10.1002/cplu.202000202.
20. Cypes S, Hagemeyer A, Hogan Z, Lesik A, Streukens G, Volpe AF Jr, Weinberg WH, Yaccato K. High throughput screening of low-temperature CO oxidation catalysts using IR thermography. *Combinatorial Chemistry and High Throughput Screening*. 2007;10:25-35. doi: 10.2174/138620707779802788.
21. Vainer BG. Quantitative characterization of vapour adsorption on solid surfaces and estimation of emissivity of solids using narrow-band short-wave infrared thermography. *Quantitative Infrared Thermography (QIRT Journal)*. 2008;5(2):175-193. doi: 10.3166/qirt.5.175-193.
22. Moates FC, Somani M, Annamalai J, Richardson JT, Luss D, Willson RC. Infrared thermographic screening of combinatorial libraries of heterogeneous catalysts. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1996;35:4801-4803. doi: 10.1021/ie960476k.
23. Vainer BG. Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3  $\mu$ m operating wavelength. *QIRT-2000*; 2000 July 18-21; Reims, France: UTAP URCA: 2000. p. 84-91. doi: 10.21611/qirt.2000.063.
24. Kurishev GL, Kovchavtzev AP, Vainer BG, Guzev AA, Bazovkin VM, Stroganov AS, Subbotin IM, Zakharov IM, Efimov VM, Postnikov KO, Lee II, Valisheva NA, Panova ZV. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 1998;4:5-10.

#### Информация об авторе:

**Вайнер Борис Григорьевич** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, профессор СУНЦ НГУ, тел. +79139103246.

**Vayner Boris Grigoryevich** – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor at SUNC NSU, phone: +79139103246

Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 01.02.2026; одобрена после рецензирования 11.03.2026; принята к публикации 27.03.2026. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 01.02.2026; approved after review on 11.03.2026; accepted for publication on 27.03.2026. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.

\*  
\*\*

### **НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ!**

**В Брянском государственном техническом университете в 2026 году продолжается приём на направление подготовки бакалавров 09.03.03 – Прикладная информатика, профиль «Компьютерное проектирование и дизайн»**

Развитие техники и технологий в современном мире предъявляют к промышленным машинам и механизмам не только требования в обеспечении надёжности, долговечности и безопасности, но и требования современного дизайна, эстетичности, удобства пользования и оптимальной конструкции. Современные системы 3D-моделирования и виртуализации позволяют на новом уровне переосмыслить промышленный дизайн и создавать инновационную, футуристичную продукцию.

В современной динамично развивающейся России, имеется недостаток в высококвалифицированных специалистах в области компьютерного проектирования и дизайна, которые способны на основе инженерных расчётов разработать инновационный дизайн промышленных объектов с применением самых современных инструментов - промышленных пакетов программ, CAD / CAM / CAE систем, а также 3D-прототипирования, систем виртуальной реальности и прикладного программирования.

Объектом профессиональной деятельности выпускника является промышленный дизайн и проектирование технических систем, машин и механизмов с помощью современных IT технологий, 3D-прототипирования и виртуализации. Областью знаний будущих выпускников является способность выполнять расчёт и проектирование машин и механизмов, применять прикладное программирование для решения технических задач и создавать современный дизайн промышленных объектов с помощью IT технологий.

Будущий выпускник будет востребован конструкторскими организациями, промышленными предприятиями, научно-исследовательскими учреждениями, высшими учебными заведениями в качестве инженера-проектировщика, прикладного программиста или дизайнера технических систем, а материально-техническая база университета и кафедры, квалифицированный преподавательский состав и продуманный учебный план подготовки бакалавра гарантирует получение студентами глубоких знаний в области промышленного дизайна, прикладного программирования и проектирования современных промышленных машин, комплексов и оборудования.

#### **Контактная информация**

Сайт университета: [www.tu-bryansk.ru](http://www.tu-bryansk.ru)  
Приемная комиссия: [pk@tu-bryansk.ru](mailto:pk@tu-bryansk.ru)

Тел.: 8 (4832) 58-82-64,  
8 (4832) 51-03-57