

Междисциплинарные исследования / Interdisciplinary Research

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595)EDN: [SXTVKH](https://www.edn.ru/SXTVKH)

УДК 621.444



Повышение эффективности работы газотурбинных двигателей в сфере сельскохозяйственного производства и энергетики

И.А. Иванов, Г.Е. Персиянова*Донской государственный технический университет,**Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Актуальность данной работы заключается в разработке стратегии новой технологии повышения эффективности работы газотурбинных двигателей, которая может быть реализована в различных мощностных агрегатах от микротурбин до силовых энергетических турбин за счет взаимодействия воды и водно-топливной композиции с высокотемпературной поверхностью камеры сгорания. Водотопливная композиция может быть реализована в виде водно-спиртовых растворов и топливоводяных эмульсий. В результате создается возможность использования биотоплива на основе глубокой переработки продукции сельскохозяйственного производства.

Цель – разработка технологии снижения расхода топлива, сокращение вредных выбросов и возможности применения альтернативных видов топлива.

Материалы и методы. В данной статье применен прагматический подход, который является одним из наиболее эффективных при реализации фундаментальных исследований для сложных систем.

Результаты. Разработана и изготовлена опытная установка, которая позволяет создать устойчивое горение вращающегося факела внутри цилиндрического корпуса и устойчивого тонкостенного вращающегося потока жидкости по внутренней поверхности корпуса при воздействии на поток сил: напора, центробежной, трения и направляющей стенки. В результате применения этого процесса в микротурбинных двигателях обеспечивается снижение температуры нагрева корпуса и повышение экономичности за счет совершенствования процесса сгорания и сокращения подачи избыточного воздуха в камеру сгорания. Разработанный процесс позволя-

ет снизить вредные выбросы и диоксид углерода отходящих газов. Изготовленная экспериментальная установка может быть использована как водогрейный котел с прямым контактным теплообменом, например, в строительстве новых объектов, где еще нет центрального теплоснабжения или в объектах сельскохозяйственного производства. В качестве дальнейшей перспективы применения данной работы предлагается использовать результаты для создания отечественных микротурбин, которые широко применяются в автономных источниках энергии в различных сферах деятельности, в частности в качестве приводов дезинтеграторов для увеличения производства растительного и животного белка.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; горение; стратегия; сельскохозяйственное производство; водосодержащая жидкость; дезинтегратор; коэффициент полезного действия; эффективность

Для цитирования. Иванов, И. А., & Персиянова, Г. Е. (2026). Повышение эффективности работы газотурбинных двигателей в сфере сельскохозяйственного производства и энергетики. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 569-584. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595>

Improving the efficiency of gas turbine engines in the field of agricultural production and energy

I.A. Ivanov, G.E. Persiyanova

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Background. The relevance of this work lies in the development of a strategy for a new technology for increasing the efficiency of gas turbine engines, which can be implemented in various power units from microturbines to power power turbines due to the interaction of water and a water-fuel composition with a high-temperature surface of the combustion chamber. The water-fuel composition can be realised in form of water-alcohol solutions and fuel-water emulsions. As a result, it is possible to use biofuels based on deep processing of agricultural products.

The **purpose** is to develop technology to reduce fuel consumption, reduce harmful emissions and the possibility of using alternative fuels.

Materials and methods. This article uses a pragmatic approach, which is one of the most effective in implementing fundamental research for complex systems.

Results. A pilot setup was developed and manufactured that enables stable combustion of a rotating flame inside a cylindrical casing and a stable thin-walled rotating fluid flow along the inner surface of the casing under the influence of pressure, centrif-

ugal force, friction, and a guide wall. Application of this process in microturbine engines reduces the casing heating temperature and increases efficiency by improving the combustion process and reducing the excess air supply to the combustion chamber. The developed process reduces harmful emissions and carbon dioxide from exhaust gases. The manufactured pilot setup can be used as a hot water boiler with direct contact heat exchange, for example, in the construction of new facilities without central heating or in agricultural production facilities. As a further potential application of this work, it is proposed to use the results to create domestically produced microturbines, which are widely used in autonomous power sources in various fields, in particular as drives for disintegrators to increase the production of plant and animal protein.

Keywords: gas turbine engine; gorenje; strategy; agricultural production; water-containing liquid; disintegrator; efficiency factor; efficiency

For citation. Ivanov, I. A., & Persiyanova, G. E. (2026). Improving the efficiency of gas turbine engines in the field of agricultural production and energy. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(3), 569-584. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-3-1595>

Введение

В настоящее время наиболее эффективной энергетической установкой, применяемой в различных сферах деятельности [13], является газовая турбина. Мировая тенденция перехода на экологически чистый транспорт требует увеличение электроэнергетической потребности газовых турбин для процесса зарядки аккумуляторных батарей автомобилей с электроприводом [12; 16]. Кроме того, во всех цивилизованных странах резко увеличивается применение микротурбин для использования в различных системах. Особенно в сельскохозяйственном производстве, где автономные энергетические системы могут реализовать тригенерацию энергий: электрической, тепловой и холода для обеспечения технологических процессов. Кроме того, применение микротурбин в качестве приводов дезинтеграторов позволит увеличить производства растительного и животного белка для питания людей и создания кормов для птицеводства и животноводства [4].

В сельскохозяйственном производстве эффективно используются микротурбины в качестве автономного источника энергии [17] для переработки продукции при значительном удалении от централизованных электрических сетей. При этом использовались микротурбинные установки зарубежного производства фирмы «Capstone». Эти установки отработывались в течение длительного периода времени и имеют очень высокие

экономические и экологические показатели. В связи с сокращением импорта образовался острый дефицит микротурбин. В настоящее время несколько фирм в России начали разрабатывать и выпускать аналогичные микротурбины в единичном производстве. Сравнительные характеристики отечественных микротурбин и зарубежных приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики отечественных и зарубежных микротурбин**Table 1. Comparative Characteristics of Domestic and Foreign Microturbines**

Марка микротурбин	Характеристики	
	КПД (%)	NOx при 15% O ₂
Зарубежные микротурбины		
Capstone C200	35	9 ppm по NOx
Turbec	32	15 ppm по NOx
Ingersoll Rand	32	5 ppm по NOx
Отечественные микротурбины		
МТЭУ-30 «Осипович»	26	40 ppm по NOx
Опытные образцы (МГТУ им. Баумана)	25-30	40 ppm по NOx
Серия «ГТА»	до 30	40 ppm по NOx

Данные характеристики показывают, что по основным показателям (электрический КПД и содержание выхлопных газов по NOx) отечественные микротурбины уступают зарубежным.

Проводимые исследования в области энергосбережения нацелены на обеспечение снижения затрат на топливно-энергетические ресурсы во всех сферах деятельности, так как стоимость их постоянно растет, в связи с сокращением добычи на хорошо освоенных месторождениях. Другой глобальной задачей является сокращение выбросов в атмосферу. Предлагаемая стратегия направлена на получение эффективных результатов в обоих направлениях, за счет совершенствования процесса горения и передачи тепла.

В России к этим проблемам добавляется еще, и техническая задача, направленная на необходимость осваивать выпуск газотурбинных двигателей для водного транспорта и газоперекачивающих станций.

Поэтому результаты данной работы могут быть использованы при совершенствовании конструкций новых газовых турбин и модернизации существующих.

В последнее время проводятся большие исследовательские работы по совершенствованию газотурбинных двигателей с целью снижения расхо-

да топлива и вредных выбросов [2; 14; 18-20]. При этом впрыск воды для совершенствования сгорания в газотурбинных двигателях (STIG-процесс) позволил на электростанциях типа «Водолей» повысить коэффициент полезного действия (КПД) на 5,9-13%, а мощность увеличить на $43 \div 130\%$ [5]. Кроме того, были проведены исследования работы авиационного двигателя НК-37 с впрыском водяного пара в камеру сгорания. При этом определены зависимости повышения эффективности от расхода пара [11].

Впрыск воды с топливом в виде водотопливной эмульсии, кроме улучшения смесеобразования, способствует в высокотемпературных локальных зонах реакции прямого взаимодействия паров воды и топлива [21].

Это обусловлено тем, что константа равновесия диссоциации молекул углеводородного топлива газойль составляет $5,24 \cdot 10^5$, воды на $\text{OH} + \text{H}$ $2,16 \cdot 10^{-6}$, на $\text{H}_2 + \text{O}$ - $6,53 \cdot 10^{-6}$, а кислорода O_2 на $\text{O} + \text{O}$ составляет $2,08 \cdot 10^{-10}$. Таким образом вначале будет проходить образование углеводородных радикалов, которые в первую очередь будут взаимодействовать с OH и O воды, а затем уже с O кислорода, так как у воды процесс диссоциации на четыре порядка выше, чем у кислорода.

В газотурбинном двигателе этот же эффект обеспечивает STIG-процесс со снижением расхода топлива, вредных выбросов и диоксида углерода и одновременным охлаждением камеры сгорания, обеспечивающий увеличение срока службы и снижение требования к материалу.

На основе исходных данных автором была поставлена задача: как эффективно реализовать STIG- процесс в газотурбинной установке малой мощности, чтобы получить больший эффект рабочего процесса и одновременно обеспечить снижение требований к материалу камеры сгорания. На основе анализа рабочего процесса в камере сгорания было решено воду подавать на внутренней поверхности камеры сгорания. В этом случае вода выполняет две функции: охлаждает стенку и способствует интенсификации парогазового цикла, но для этого необходимо обеспечить устойчивость пленки воды на поверхности камеры. На основе патентного анализа было найдено подобное решение за счет вращения камеры сгорания [15]. Однако это решение практически трудно реализовать. Анализ аналогичных процессов в других системах показал, что в нагревательной установке чтобы осуществить прямой контактный теплообмен между источником тепла и теплоносителем, жидкий теплоноситель подают сверху в зону нагрева на вращающуюся обечайку и за счет вращения этой обечайки на ее внутренней поверхности формируется тонкопленочный уплотненный жидкостный слой теплоносителя, который под собствен-

ным весом смещается вдоль стенки обечайки сверху вниз и нагревается от источника тепла [3].

Таким образом, по известным данным образование тонкостенного слоя можно реализовать за счет центробежной силы вращения конструкции. Но практически реализовать данный способ очень сложно. Поэтому была поставлена задача: как создать силовое центробежное воздействие без вращения системы.

Материалы и методы

Данная статья посвящена разработке новой стратегии повышения эффективности жизненного цикла газотурбинных двигателей и нагревательных систем за счет оригинального способа подачи воды в камеру сгорания. Для этой цели была реализована центробежная сила путем воздействия формы впускного отверстия и воздействия специальной направляющей стенки, что обеспечило тонкостенный слой на внутренней поверхности цилиндрического корпуса камеры сгорания. В результате происходит одновременное улучшение процесса горения и охлаждения камеры сгорания, что дает возможность сократить количество избыточного воздуха подаваемого в камеру сгорания для его охлаждения [6; 7].

В результате повышается КПД, увеличивается срок службы двигателя и снижается его стоимость. Причем, эффект может быть реализован как в микротурбинах, так и в мощных промышленных турбинах, что способствует снижению стоимости электроэнергии и сокращению вредных выбросов и диоксида углерода в атмосферу. При этом, ставится задача реализовать синергетический эффект взаимодействия, нагретого корпуса камеры сгорания с вихревым потоком водосодержащей жидкости, что обеспечивает снижение расхода топлива за счет повышения КПД при сокращении количества подаваемого воздуха с целью охлаждения и уменьшения вредных выбросов за счет каталитического воздействия паров воды. При высокой температуре эффективность данного процесса повышается. Новизна идеи защищена патентом на изобретение [6].

В настоящее время прагматический подход является одним из наиболее эффективных при реализации фундаментальных исследований для сложных систем, который подразумевает стратегическое сочетание и взаимодействие устоявшихся качественных подходов для достижения целей исследования с использованием индуктивного и дедуктивного процесса.

При этом прагматический подход позволяет анализировать процесс взаимодействия центробежной силы вихревого потока с направляющей

стенкой и процесса взаимодействия водосодержащей жидкости с высокотемпературной нагретой поверхностью в камере сгорания.

Результаты исследования и их обсуждение

Для решения проблемы автором предложена следующая идея. Образование пристеночного слоя осуществить за счет воздействия центробежной силы вихревого потока жидкости на направляющую стенку. Таким образом за счет воздействия направляющей стенки и центробежной силы образуется пристеночный слой, который движется одновременно коаксиально и тангенциально вращаясь в сторону основания нагревательной установки, что обеспечивает прямой контактный теплообмен, со снижением расхода топлива, вредных выбросов. В газотурбинном двигателе эффективность процесса значительно усиливается за счет охлаждения камеры сгорания и каталитических реакций взаимодействием высокотемпературной поверхности камеры сгорания водосодержащей жидкостью, обеспечивающий увеличение срока службы и снижение требования к материалу. Причем, для усиления эффекта, в газотурбинных двигателях в качестве водосодержащей жидкости могут быть использованы кроме просто воды - вода с водно-растворимыми присадками, водно-спиртовой раствор и водно-топливные композиции [8; 15].

Схема процесса горения в камере сгорания газовой турбины представлена на рисунке 1.

Данная установка работает как обычный газотурбинный двигатель, но дополнительно на внутреннюю поверхность подается вода, которая выполняет две функции: с одной стороны, улучшает рабочий процесс [7], а с другой стороны охлаждает стенку камеры сгорания, что позволяет снизить требования к материалу и увеличить срок службы.

Для газотурбинных двигателей, кроме снижения средней температуры цикла, большое значение имеет снижение температуры стенки корпуса камеры сгорания для увеличения срока службы.

Для проверки возможности реализации разработанного эффекта в начале эксперименты были проведены на моделях, а затем создана экспериментальная установка, которая позволила выявить сам эффект создания слоя из водосодержащей жидкости на внутренней цилиндрической поверхности и влияние на этот процесс направляющей стенки. Причем, в модельных испытаниях направляющей стенки не было, но в процессе экспериментальных исследований была выявлена необходимость использования данной направляющей стенки, которая создавала стабилизацию

потока. На рисунке 2 представлен общий вид экспериментальной установки, а на рисунке 3 – вид сверху процесса работы этой установки с изображением горящего факела внутри камеры, и движущийся поток жидкости на внутренней поверхности цилиндра. Схема потоков горящего факела топлива в контакте с потоком жидкости по внутренней поверхности цилиндра изображена на рисунке 4.

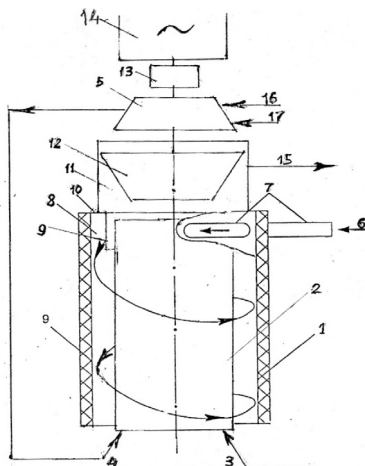


Рис. 1. Схема процесса горения в камере сгорания газовой турбины:

1 – внутренний объем камеры сгорания; 2 – источник тепловой энергии; 3 – горючее; 4 – воздух от нагнетателя; 5 – нагнетатель воздуха; 6 – водосодержащая жидкость; 7 – трубопровод; 8 – полость; 9 – направляющая стенка; 10 – перегородка; 11 – рабочая камера; 12 – турбина; 13 – редуктор; 14 – электрогенератор; 15 – парогазовая смесь; 16 – воздух из атмосферы; 17 – газы системы рециркуляции

Fig. 1. Scheme of combustion process in combustion chamber of gas turbine:

1 – internal volume of combustion chamber; 2 – heat source; 3 – fuel; 4 – air from supercharger; 5 – air supercharger; 6 – water-containing liquid; 7 – pipeline; 8 – cavity; 9 – guide wall; 10 – partition; 11 – working chamber; 12 – turbine; 13 – reducer; 14 – electric generator; 15 – steam-gas mixture; 16 – air from atmosphere; 17 – gases of recirculation system

В качестве источника пламени была использована типовая горелка водогрейного котла мощностью 50 кВт. Изображение соприкасающихся движущих потоков жидкости и пламени в одном корпусе не было известно в мировой практике и является информацией о принципиально новом процессе.

Данные эксперименты послужили основой для разработки изобретения «Способ работы газотурбинной установки и устройство для его осуществления» [6].



Рис. 2. Опытная установка для определения эффекта прямого контактного теплообмена между горящим факелом и водой, циркулирующей по внутренней поверхности цилиндра

Fig. 2. Pilot plant for determining the effect of direct contact heat transfer between a burning torch and water circulating along the inner surface of the cylinder



Рис. 3. Внешний вид процесса взаимодействия горящего факела топлива в контакте с потоком жидкости по внутренней поверхности цилиндра (Вид сверху)

Fig. 3. Appearance of the process of interaction of a burning fuel torch in contact with a liquid flow along the inner surface of the cylinder (Top view)

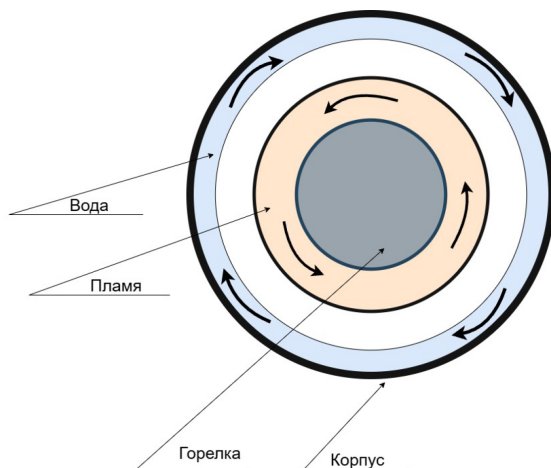


Рис. 4. Схема потоков горящего факела топлива в контакте с потоком жидкости по внутренней поверхности цилиндра согласно рис. 3.

Fig. 4. Flow diagram of a burning fuel torch in contact with a liquid flow along the inner surface of the cylinder according to Fig. 3

Разработчики микротурбин в России и мире практически не публикуют результаты исследований, а по известным публикациям процесс контакта водосодержащей жидкости и пламени в газовой турбине не отработан и не известен.

Заключение

1. Предлагается стратегия новой технологии повышения эффективности работы газотурбинных двигателей, которая может быть реализована в различных мощностных агрегатах от микротурбин до мощных энергетических турбин за счет подачи водосодержащей жидкости на внутреннюю поверхность камеры сгорания с образованием тонкостенного слоя водосодержащей жидкости. В результате снижается потребность избыточного количества воздуха для охлаждения камеры сгорания, что повышает КПД газовой турбины и улучшаются экологические показатели.

2. Проведенные испытания показали, что идея, заложенная в патенте №2663830 F02C3/308 может быть реализована на практике, при мощности горелки 50 кВт.

3. Конструктивные параметры опытной установки позволяют создать устойчивое горение вращающегося факела внутри цилиндрического кор-

пуса и устойчивого тонкостенного вращающегося потока жидкости по внутренней поверхности корпуса при воздействии на поток сил: напора, центробежной, трения и направляющей стенки.

4. Изготовленная экспериментальная установка может быть использована как водогрейный котел с прямым контактным теплообменом, например, в строительстве новых объектов, где еще нет центрального теплоснабжения или в объектах сельскохозяйственного производства.

5. В качестве водосодержащей жидкости могут быть использованы водотопливные композиции, которые позволяют повысить эффективности данного процесса в камере газотурбинного двигателя и снизить вредные выбросы в атмосферу.

6. Предлагаемый способ может быть применен для создания форсажного режима газотурбинных двигателей в процессе аварийных и экстремальных ситуациях [1; 18].

7. В качестве дальнейшей перспективы применения данной работы предлагается использовать результаты для создания отечественных микротурбин, которые широко применяются в автономных источниках энергии в различных сферах деятельности, особенно в сельскохозяйственном производстве путем создания тригенерации: электричества, тепла и холода, что позволит обеспечить эффективность технологических процессов. Для увеличения сферы применения этих турбин автором предложена идея возрождения дезинтеграторной технологии [9; 10] на новом технологическом уровне за счет применения микротурбин в качестве привода роторов дезинтегратора, что дает возможность увеличить производство белка для питания людей и кормовой базы в птицеводстве и животноводстве.

8. Метод повышения эффективности газотурбинного двигателя может применяться в различных сферах сельскохозяйственного производства. В частности, на его основе можно реализовать новый процесс биотехнологии, связанный с получением белка из люпина за счет дезинтеграторной обработки зерна люпина, что даст возможность увеличить производство белка и повысить его качество для питания животных и людей.

Список литературы

1. Агульник, А. Б., Нелюбин, В. Р., Онищик, И. И., Павлов, А. С., & Ярмаш, А. Д. (2018). Использование методов численного моделирования турбулентных течений при разработке форсажных камер сгорания газотурбинного двигателя. *Насосы. Турбины. Системы*, (1), 66–74. EDN: <https://elibrary.ru/XQZBMT>

2. Беседин, С. Н., Рассохин, В. А., Барсков, В. В., & Осипов, А. В. (2017). Создание перспективных малогабаритных газотурбинных установок с независимыми частотами вращения компрессора и турбины. *Вестник Брянского Государственного Технического Университета*, (8), 12–18. https://doi.org/10.12737/article_5a3779fc1eb7c5.51727041. EDN: <https://elibrary.ru/YANHET>
3. Васин, В. В., и др. (2002). Патент РФ № 2178125. F 24 Н 1/16. Способ нагрева жидкого теплоносителя и устройство для его осуществления.
4. Ivanov, I., & Persiyanova, G. (2024). Strategy of increasing protein production based on lupin and nano disintegrator technology. В *BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (AQUACULTURE 2023)* (Vol. 84, p. 01049). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401049>. EDN: <https://elibrary.ru/TEXDXB>
5. Ivanov, I. (2019). The development of a strategy for improving low-power gas turbine engines. *E3S Web of Conferences*, 135, 01089. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501089>. EDN: <https://elibrary.ru/UJACOA>
6. Иванов, И. А. (2018). Патент РФ № 2663830. F02C3/308. Способ работы газотурбинной установки и устройство для его осуществления.
7. Иванов, И. А., Авласенко, И. В., & Гаценко, Е. В. (2018). Перспективы использования воды для процесса горения в тепловых двигателях. *Наукоемкие технологии*, 19(2), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/YWFQOW>
8. Иванов, И. А. (2015). Патент РФ № 2559055. Водно-топливная композиция и способ ее приготовления.
9. Иванов, И. А. (2015). Патент РФ № 2552869. F17D 1/16. Способ транспорта продуктов по трубопроводу и устройство для его осуществления.
10. Ivanov, I., & Avlasenko, I. (2019). Development of a strategy to increase the efficiency of oil transportation through the pipeline. *E3S Web of Conferences*, 135. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501090>. EDN: <https://elibrary.ru/LBATYF>
11. Кудинов, А. А., & Горланов, С. П. (2014). Повышение эффективности газотурбинной установки путем впрыска водяного пара в камеру сгорания двигателя НК-37. *Самарский государственный технический университет*, 4(1), 103–110. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2014.01.18>. EDN: <https://elibrary.ru/SEAUAN>
12. Надареишвили, Г., Костюков, А., & Карпукhin, К. (2019). Особенности конструкции при использовании эффективной микротурбины в качестве двигателя с расширенным диапазоном. *Наука и техника*, 18(6), 447–460. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-6-447-460>. EDN: <https://elibrary.ru/EEFDTF>
13. Ольховский, Г. Г., & Пугач, К. С. (2020). *Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и парогазовых установок в электроэнергетике РФ*. Российская Академия Наук.

14. Pashchenko, D., Mustafin, R., & Karpilov, I. (2022). Thermochemical recuperation by steam methane reforming as an efficient alternative to steam injection in the gas turbines. *Energy*, 258, 124913. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124913>
15. Пустынцев, А. А. (2006). Патент РФ № 2084674. F02K3/38, F02C3/30. Парогазовый реактивный двигатель.
16. Рассохин, А., Забелин, Н. А., & Матвеев, Ю. В. (2011). Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом. *Глобальная энергия*, (4), 41–51.
17. Рыбачук, В. Г. (2020). Актуальность применения микротурбинных установок в качестве автономных источников энергии. *Молодой ученый*, (6), 80–82. <https://moluch.ru/archive/296/67133>. EDN: <https://elibrary.ru/EQIVAV>
18. Görgülü, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Koç, A. (2020). Comprehensive analysis of the effect of water injection on performance and emission parameters of the hydrogen fuelled recuperative and non-recuperative gas turbine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 34254–34267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.038>. EDN: <https://elibrary.ru/HKOCKH>
19. Reale, F., & Sannino, R. (2021). Water and steam injection in micro gas turbine supplied by hydrogen enriched fuels: Numerical investigation and performance analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24366–24381. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.169>
20. Seljak, T., Buffi, M., Valera-Medina, A., Chong, C. T., Chiaramonti, D., & Katrašnik, T. (2020). Bioliquids and their use in power generation — A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109930. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109930>. EDN: <https://elibrary.ru/CAKLWL>
21. Гладков, О. А., Бернштейн, Е. В., & Виноградов, Д. П. (1989). Характер воздействия водотопливной эмульсии на процесс сгорания топлива в дизеле. *Двигателестроение*, (10), 10–12, 33.

References

1. Agulnik, A. B., Nelyubin, V. R., Onishchik, I. I., Pavlov, A. S., & Yarmash, A. D. (2018). The use of numerical simulation methods for turbulent flows in the development of afterburner combustion chambers for a gas turbine engine. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, (1), 66–74. EDN: <https://elibrary.ru/XQZBMT>
2. Besedin, S. N., Rassokhin, V. A., Barskov, V. V., & Osipov, A. V. (2017). Development of promising small-sized gas turbine units with independent rotational speeds of the compressor and turbine. *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, (8), 12–18. https://doi.org/10.12737/article_5a3779fc1eb7c5.51727041. EDN: <https://elibrary.ru/YAHHET>

3. Vasin, V. V., et al. (2002). Russian Federation Patent No. 2178125. F 24 H 1/16. Method for heating a liquid heat carrier and a device for its implementation.
4. Ivanov, I., & Persyanova, G. (2024). Strategy of increasing protein production based on lupin and nano disintegrator technology. In *BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Development and Modern Problems of Aquaculture" (AQUACULTURE 2023)* (Vol. 84, p. 01049). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401049>. EDN: <https://elibrary.ru/TEXDXB>
5. Ivanov, I. (2019). The development of a strategy for improving low-power gas turbine engines. *E3S Web of Conferences*, 135, 01089. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/201913501089>. EDN: <https://elibrary.ru/UJACOA>
6. Ivanov, I. A. (2018). Russian Federation Patent No. 2663830. F02C3/308. Method of operation of a gas turbine unit and a device for its implementation.
7. Ivanov, I. A., Avlasenko, I. V., & Gatsenko, E. V. (2018). Prospects for using water in the combustion process in thermal engines. *Naukoemkie Tekhnologii*, 19(2), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/YWFQOW>
8. Ivanov, I. A. (2015). Russian Federation Patent No. 2559055. Water-fuel composition and method of its preparation.
9. Ivanov, I. A. (2015). Russian Federation Patent No. 2552869. F17D 1/16. Method for transporting products through a pipeline and a device for its implementation.
10. Ivanov, I., & Avlasenko, I. (2019). Development of a strategy to increase the efficiency of oil transportation through the pipeline. *E3S Web of Conferences*, 135. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501090>. EDN: <https://elibrary.ru/LBATYF>
11. Kudinov, A. A., & Gorlanov, S. P. (2014). Improving the efficiency of a gas turbine unit by injecting water vapor into the combustion chamber of the NK-37 engine. *Samara State Technical University*, 4(1), 103–110. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2014.01.18>. EDN: <https://elibrary.ru/SEAUAH>
12. Nadareishvili, G., Kostyukov, A., & Karpukhin, K. (2019). Design features when using an efficient microturbine as an engine with an extended range. *Nauka i tekhnika*, 18(6), 447–460. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-6-447-460>. EDN: <https://elibrary.ru/EEFDTF>
13. Olkhovsky, G. G., & Pugach, K. S. (2020). *Scientific and technical problems of the widespread use of gas turbine and combined cycle plants in the power industry of the Russian Federation*. Russian Academy of Sciences.
14. Pashchenko, D., Mustafin, R., & Karpilov, I. (2022). Thermochemical recuperation by steam methane reforming as an efficient alternative to steam injection in the gas turbines. *Energy*, 258, 124913. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124913>
15. Pustyntsev, A. A. (2006). Russian Federation Patent No. 2084674. F02K3/38, F02C3/30. Combined-cycle jet engine.

16. Rassokhin, A., Zabelin, N. A., & Matveev, Y. V. (2011). Main directions of development of microturbine technologies in Russia and abroad. *Global Energy*, (4), 41–51.
17. Rybachuk, V. G. (2020). The relevance of using microturbine units as autonomous energy sources. *Molodoy Uchenyy*, (6), 80–82. <https://moluch.ru/archive/296/67133>. EDN: <https://elibrary.ru/EQIVAV>
18. Görgülü, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Koç, A. (2020). Comprehensive analysis of the effect of water injection on performance and emission parameters of the hydrogen fuelled recuperative and non-recuperative gas turbine system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 34254–34267. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.038>. EDN: <https://elibrary.ru/HKOCKH>
19. Reale, F., & Sannino, R. (2021). Water and steam injection in micro gas turbine supplied by hydrogen enriched fuels: Numerical investigation and performance analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(47), 24366–24381. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.169>
20. Seljak, T., Buffi, M., Valera-Medina, A., Chong, C. T., Chiaramonti, D., & Katrašnik, T. (2020). Bioliquids and their use in power generation — A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109930. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109930>. EDN: <https://elibrary.ru/CAKLWL>
21. Gladkov, O. A., Bernshtein, E. V., & Vinogradov, D. P. (1989). The effect of a water-fuel emulsion on the fuel combustion process in a diesel engine. *Dvigatelsestroyeniye*, (10), 10–12, 33.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Иванов Игорь Алексеевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Менеджмент и бизнес-технологии»

Донской государственный технический университет

пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Российская Федерация

igoriv740@yandex.ru

Персиянова Галина Евгеньевна, ведущий инженер кафедры «Менеджмент и бизнес-технологии»

Донской государственный технический университет

пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Российская Федерация

persyanova.galina@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Igor A. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor in the Department of Management and Business Technologies

Don State Technical University

1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

igoriv740@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2723-0626>

Galina E. Persiyanova, Lead Engineer, Department of Management and Business Technologies

Don State Technical University

1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

persiyanova.galina@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3901-0332>

Поступила 10.01.2026

После рецензирования 02.04.2026

Принята 21.04.2026

Received 10.01.2026

Revised 02.04.2026

Accepted 21.04.2026