

Дата поступления рукописи в редакцию: 04.06.2026 г.

Дата принятия рукописи в печать: 08.07.2026 г.

DOI: 10.24412/3034-4042-2026-3-9-15

ГОСТЕВ Евгений Александрович,
магистрант,
ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ),
e-mail: dijhojee@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ В РОССИИ

Аннотация. Аддитивные технологии в современной теплоэнергетике перешли из категории экспериментальных разработок в разряд практически значимых производственных решений, позволяющих реализовывать принципиально новые конструктивные подходы. В данной статье представлен анализ и обобщение мирового и отечественного опыта применения методов 3D-печати при создании теплообменного оборудования и элементов энергетических установок. Методологическую основу исследования составили аналитический и сравнительный методы, примененные к изучению открытых научных публикаций и отраслевых отчетов. Новизна работы заключается в комплексном рассмотрении как зарубежных достижений в области топологически оптимизированных теплообменников и гибридных структур, так и формирующегося российского научно-технического задела в данной сфере. В ходе исследования выявлены ключевые направления применения 3D-печати: создание топологически оптимизированных теплообменников, охлаждаемых лопаток газовых турбин, решетчатых структур для интенсификации теплообмена, а также элементов контурных тепловых труб. Область применения полученных результатов охватывает проектирование и производство теплообменного оборудования для атомной, тепловой и гидроэнергетики, аэрокосмическую промышленность, системы терморегулирования, а также технологии ремонта и восстановления деталей энергооборудования. В работе систематизированы сведения о деятельности ключевых отечественных организаций, развивающих полный цикл аддитивного производства для энергетики, и представлены результаты прикладных исследований ведущих технических университетов и отраслевых институтов. Особое внимание уделено практическим разработкам: сложнопрофильным лопаткам газовых турбин, высокоэффективным теплообменникам-рекуператорам, теплоотводам для силовой электроники и элементам контурных тепловых труб для систем терморегулирования космических аппаратов. Основные выводы свидетельствуют о формировании в России устойчивой научно-производственной базы, способной обеспечить импортозамещение критических компонентов и создание оригинальных конструкторских решений. Перспективы дальнейшего развития связаны с углублением междисциплинарных исследований, интеграцией методов искусственного интеллекта в процессы проектирования и масштабированием успешных разработок до серийного производства.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, теплоэнергетика, теплообменник, топологическая оптимизация, газовая турбина, тепловая труба.

GOSTEV Evgenii Aleksandrovich,
2nd year Master's student,
RUT (MIIT)

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF THERMAL ENERGY AND HEAT ENGINEERING IN RUSSIA

Annotation. Additive technologies in modern thermal power engineering have transitioned from the category of experimental developments to the rank of practically significant production solutions, enabling the implementation of fundamentally new design approaches. This article presents an analysis and synthesis of global and domestic experience in the application of 3D printing methods for the creation of heat exchange equipment and components of power plants. The methodological basis of the study comprised analytical and comparative methods applied to the examination of open scientific publications and industry reports.

The novelty of the work lies in its comprehensive consideration of both foreign achievements in the field of topologically optimized heat exchangers and gyroid structures, and the emerging Russian scientific and technical groundwork in this area. The study identified key directions for the application of 3D printing: the creation of topologically optimized heat exchangers, cooled gas turbine blades, lattice structures for heat transfer intensification, and elements of loop heat pipes. The field of application of the obtained results encompasses the design and production of heat exchange equipment for nuclear, thermal, and hydropower engineering, the aerospace industry, thermal control systems, as well as technologies for the repair and restoration of power equipment parts. The work systematizes information on the activities of key Russian organizations developing the full cycle of additive manufacturing for the energy sector and presents the results of applied research from leading technical universities and industry institutes. Special attention is paid to practical developments: complex-profile gas turbine blades, high-efficiency heat exchanger-recuperators, heat sinks for power electronics, and elements of loop heat pipes for spacecraft thermal control systems. The main conclusions indicate the formation of a sustainable scientific and production base in Russia, capable of ensuring the import substitution of critical components and the creation of original design solutions. Prospects for further development are associated with the deepening of interdisciplinary research, the integration of artificial intelligence methods into design processes, and the scaling of successful developments to serial production.

Key words: additive technologies, 3D printing, thermal power engineering, heat exchanger, topology optimization, gas turbine, heat pipe.

Современный этап развития энергетического машиностроения характеризуется переходом от субтрактивных методов обработки к аддитивным технологиям, основанным на принципе послойного наращивания материала. Данный подход, реализуемый с помощью 3D-принтеров, позволяет создавать геометрически сложные структуры с заданными свойствами, недоступные для традиционных методов литья или фрезерования. В мировой практике аддитивные технологии уже перешли из категории прототипирования в промышленное производство, открывая возможности для топологической оптимизации теплообменного оборудования и элементов энергоустановок [13].

В Российской Федерации наблюдается формирование научно-производственной базы в области аддитивного производства для теплоэнергетики. Ведущие технические университеты и отраслевые институты демонстрируют опытные разработки сложнопрофильных лопаток газовых турбин, высокоэффективных теплообменников-рекуператоров и элементов контурных тепловых труб. Однако при анализе отечественного опыта необходим критический подход: заявленные достижения требуют сопоставления с реальными объемами внедрения. Ключевыми ограничениями выступают недостаточное качество и высокая стоимость отечественных металлических порошков, экономическая нецелесообразность печати крупногабаритных изделий, а также проблемы сертификации аддитивной продукции для ответственного применения в энергетике [14].

В рамках данной работы рассматриваются современные тенденции применения аддитивных технологий в мировой и отечественной теплоэнергетике. Далее представлен анализ зарубежного опыта создания теплообменного оборудования и элементов энергоустановок с использованием 3D-печати, после чего следует обзор соответствующих российских разработок и достижений

в этой области.

Зарубежные исследования в области теплоэнергетики все чаще демонстрируют эффективность аддитивных технологий для создания принципиально новых теплообменных аппаратов, позволяя реализовывать геометрически сложные конструкции, недоступные при традиционном производстве. Это открывает путь к значительной интенсификации теплообмена и повышению компактности оборудования.

Одним из перспективных направлений является сочетание топологической оптимизации и лазерной порошковой наплавки. Исследователи из Университета Висконсин-Мэдисон провели цикл работ по созданию рекуператоров из жаропрочного сплава Haynes 282 для установок со сверхкритическим диоксидом углерода. Сравнение теплообменников с традиционными прямыми каналами и оптимизированной решетчатой структурой показало, что при температурах до 800°C топологически оптимизированная конструкция обеспечивает увеличение теплопередающей способности на 115%, рост эффективности с 68,7% до 83,6% и повышение удельной массовой мощности на 27,6%. Несмотря на некоторый рост гидравлического сопротивления, общий прирост эффективности подтверждает высокий потенциал данного подхода [22].

Другим важным классом конструкций являются поверхности с тройной периодической минимальной кривизной типа «гириод». Итальянские ученые экспериментально исследовали теплообменники с гириодной структурой, изготовленные из PLA-пластика методом послойного наплавления, в режиме косвенного испарительного охлаждения. Результаты показали, что благодаря высокой удельной поверхности гириодные структуры обеспечивают коэффициенты конвективной теплоотдачи до 170 Вт/(м²·К) в турбулентном режиме. Во влажных условиях их объемная охлаждающая способность оказалась в три раза выше

традиционных пластинчатых теплообменников, а эффективность по смоченному термометру достигала 90% [18].

Аддитивные технологии также активно внедряются в космической теплоэнергетике. Исследователи Технологического института Джорджии разработали установку VAPOR для испытаний в условиях микрогравитации теплообменников с термокапиллярными устройствами управления двухфазным хладагентом. Прототипы баков и внутренних конструкций, изготовленные методом стереолитографии, подтвердили работоспособность концепции перераспределения паровой фазы с помощью локального подвода тепла, что позволяет создавать более компактные двигательные установки для малых спутников [20].

Значительный прогресс достигнут и в охлаждении электронных компонентов с высокой плотностью тепловыделения. Французские исследователи применили генетический алгоритм для топологической оптимизации каналов жидкостного теплоотвода с несколькими локальными источниками тепла. Благодаря вторичным и поперечным течениям в оптимизированной геометрии число Нуссельта возросло более чем на 49% по сравнению с эталонной конструкцией, а инфракрасная термография подтвердила адекватность разработанных численных моделей [21].

Системный подход к внедрению искусственного интеллекта и аддитивных технологий реализуется во французской программе PEPR DIADEM. Эта инициатива объединяет ведущие научные центры для создания национальной сети платформ, занимающихся разработкой новых материалов и теплообменных аппаратов для энергетики будущего, включая проекты по созданию керамических композитов для экстремальных условий и топологически оптимизированных теплообменников с помощью 4D-печати [19].

Российская Федерация же демонстрирует устойчивую динамику в освоении и внедрении аддитивных технологий в теплоэнергетическом комплексе, что обусловлено как общемировыми трендами, так и необходимостью обеспечения технологического суверенитета. Наиболее системный подход к интеграции 3D-печати реализует Госкорпорация «Росатом». В структуре топливной компании «ТВЭЛ» создано предприятие «Росатом Аддитивные Технологии», которое консолидирует усилия по разработке оборудования, порошковых материалов и непосредственному изготовлению изделий [3]. Ключевым достижением стал запуск серийного производства 3D-принтеров RusMelt 310M, работающих по технологии селективного лазерного сплавления (SLM) и оснащенных отечественным программным обеспечением. Данные установки ориентированы на тяжелое машиностроение, авиационную и атомную промышленность [6]. Кроме того, в конце 2024 года на Чепецком механическом заводе (ЧМЗ) запущена линия по производству титановых по-

рошков фракцией 20-63 мкм, что должно полностью обеспечить потребности внутреннего рынка в этом сырье. Однако, несмотря на эти успехи, качество отечественных металлопорошковых композиций, включая титановые, пока может уступать зарубежным аналогам по стабильности гранулометрического состава и сферичности частиц, что напрямую влияет на текучесть и равномерность спекания [5]. Критическим узким местом также остается высокая стоимость печати и зависимость от импортных комплектующих: ключевые элементы принтеров RusMelt, такие как лазерные излучатели и сканирующие системы, производятся предприятиями «Росатома», однако их компонентная база часто имеет иностранное происхождение, что создает потенциальные риски для ремонтпригодности [1; 3].

Важным направлением, призванным решить проблему отсутствия единых требований к продукции, является нормотворческая деятельность. Для координации работ в этой сфере Приказом Росстандарта был создан Технический комитет по стандартизации «Аддитивные технологии» (ТК 182) [7]. Активное участие в его работе принимает ООО «РосАТ», что способствует утверждению новых государственных стандартов, регламентирующих свойства металлопорошковых композиций и методы контроля качества. Это создает необходимую нормативную базу для широкого промышленного внедрения, однако процесс разработки и утверждения стандартов все еще отстает от темпов развития самих технологий [5].

Патентная активность в области аддитивного производства свидетельствует о поиске новых конструктивных решений для теплотехники. В патенте на пластинчатый теплообменник для газотурбинной установки предлагается изготовление трех секций устройства методом SLM из нержавеющей стали 12X18H10T. Применение 3D-печати позволяет реализовать сложные спиралевидные турбулизаторы в каналах, причем их диаметр дифференцирован для оптимизации гидравлического сопротивления потоков разной плотности [9]. Другим примером является тепловыделяющая сборка ядерного реактора (варианты), где аддитивные технологии (газолазерная резка или прямое лазерное спекание) предлагается использовать для изготовления антидебрисного фильтра второго поколения. Данный фильтр, представляющий собой сложную систему наклонных пластин, обеспечивает высокую эффективность задержания посторонних предметов при минимальном гидравлическом сопротивлении [8]. Тем не менее, в обоих патентах отсутствуют данные о сравнительной экономической эффективности аддитивного метода по сравнению с традиционными (штамповкой, литьем) и не приводятся результаты ресурсных испытаний напечатанных узлов в условиях реальных нагрузок.

Фундаментальные и прикладные исследования активно ведутся в университетской среде. В

НИУ «МЭИ» совместно с МАИ разработана методика проектирования охлаждаемых лопаток газовых турбин с применением аддитивных лазерных технологий (селективного лазерного сплавления), позволяющая изготавливать модели каналов охлаждения для опережающей верификации тепловых и гидравлических характеристик до выпуска рабочей документации [15]. В КНИТУ-КАИ экспериментально исследуются трехмерные решетчатые структуры (латтисы), напечатанные из хромоникелевой стали. Результаты показывают, что топологическая оптимизация таких структур позволяет управлять теплоотдачей и создавать более легкие радиаторы для охлаждения электронного оборудования. Однако выявлено, что в центре пористой сетки латтисов образуются застойные зоны, ограничивающие поток теплоносителя и снижающие эффективность при малых тепловых нагрузках [4]. В СПбПУ в рамках программы «Приоритет-2030» ведутся работы по созданию форсунок камер сгорания и лопаток газовых турбин из российских жаропрочных сплавов, а также проектирование перемешивающих решеток для малого модульного ядерного реактора (ММР). Ожидается, что применение оптимизированных решеток позволит снизить стоимость вырабатываемой электроэнергии, однако информация о реальных испытаниях этих изделий в составе реактора отсутствует [17].

Значительный объем работ приходится на разработку элементов систем терморегулирования для космической техники. В АО «НПО Лавочкина» методом SLM изготавливаются экспериментальные образцы вторичных капиллярных структур для испарителей контурных тепловых труб. Исследования показали, что наибольший капиллярный напор обеспечивает структура с ромбовидными отверстиями. Однако авторы отмечают, что для аксиальных тепловых труб, традиционно производимых методом экструзии, преимущества 3D-печати не столь очевидны, так как она не дает значительной выгоды по сравнению с хорошо отработанной классической технологией [11]. В АО «Центр перспективных разработок» изучается возможность замены металлических закладных элементов в композитных конструкциях космических аппаратов на напечатанные из ПЭЭК (полиэфирэфиркетона) с углеродным наполнителем. Это позволяет снизить массу на 30-40%, однако применение термопластов в условиях открытого космоса требует тщательной верификации их стойкости к радиации и термоциклам. Кроме того, обеспечение надежной адгезии между напечатанным полимерным лейнером и силовой композитной оболочкой баллона давления остается сложной инженерной задачей [12].

В учебных целях и для верификации расчетных моделей применяются более доступные технологии. Например, в РУТ (МИИТ) студенческие команды проектируют и печатают на 3D-принтере профили теплообменных поверхностей для

поиска геометрии с минимальным гидравлическим сопротивлением [2]. В УрФУ с использованием FDM-печати пластиком PETG и PLA создан миниатюрный стенд осевого компрессора для верификации расчетных моделей. Как показал прочностной анализ, использование полимеров накладывает жесткие ограничения: предельная частота вращения ротора не превышает 24 000 об/мин, а степень повышения давления составляет всего 1,0027. Это существенно ограничивает область применения таких стендов для моделирования реальных режимов работы, где требуются жаропрочные металлы и более высокие механические нагрузки [10].

Отдельным направлением является разработка регенеративных теплообменников со сложной поверхностью, описываемой уравнением гироида. Эксперименты, проведенные с образцами, напечатанными из PLA, показали, что уменьшение размера ячейки вдвое увеличивает коэффициент теплоутилизации на 62,9%. Однако критическим недостатком таких разработок остается то, что полимерные материалы не могут применяться в высокотемпературных контурах реальных энергоустановок. Переход на металлическую печать приведет к резкому удорожанию изделия и потребует решения проблем с качеством внутренних поверхностей сложных решетчатых конструкций [16].

Несмотря на наличие значительного задела и ряда успешных проектов, развитие аддитивных технологий в российской теплоэнергетике сдерживается комплексом факторов. Высокая стоимость оборудования и материалов, зависимость от импортных комплектующих, недостаточная стабильность свойств отечественных порошков, а также проблемы с постобработкой и обеспечением требуемых ресурсных характеристик изделий остаются нерешенными [1; 3; 5]. Зачастую экономически оправданным является лишь штучное или мелкосерийное производство особо ответственных деталей, а широкое внедрение в серийное производство сталкивается с отсутствием верифицированной документации и консерватизмом потребителей.

Проведенный анализ показывает, что аддитивные технологии стали важным инструментом развития современной теплоэнергетики, позволяя создавать топологически оптимизированные теплообменники и сложные каналы охлаждения с повышенной эффективностью. В России сформирован устойчивый вектор развития этих технологий при ключевой роли Госкорпорации «Росатом», выстраивающей полный производственный цикл. Однако сохраняются узкие места: качество отечественных металлических порошков уступает импортным аналогам, а ключевые элементы 3D-принтеров остаются импортозависимыми. Научные коллективы демонстрируют прорывные разработки (лопатки газовых турбин, теплообменники сложной геометрии, элементы косми-

ческих тепловых труб), но их внедрение сдерживается высокой стоимостью металлопечати и отсутствием верифицированной нормативной базы. Экономически оправданным сегодня остается лишь штучное производство особо ответственных деталей.

Таким образом, аддитивные технологии прочно занимают свое место в отечественной теплоэнергетике, однако темпы их масштабирования будут напрямую зависеть от решения проблем качества сырья, локализации комплектующих и снижения себестоимости продукции.

Список литературы:

- [1] Абрамов И.В. Проблемы развития аддитивного производства в России в контексте цифровой трансформации экономики // Организационно-экономические и инновационно-технологические проблемы модернизации экономики России. — Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2023. — С. 13-19.
- [2] Костин А.В., Агафонова И.В., Истомин К.Г., Новацкий Г.П., Уколов Д.С. Модели теплообменных модулей для учебно-исследовательского стенда // Актуальные аспекты развития науки и общества в эпоху цифровой трансформации. М. 2023. с. 100-107.
- [3] Кожиев А.Ю. Российский опыт применения технологий аддитивного производства в атомной отрасли // Актуальные вопросы современной экономики. — 2024. — №. 11. — С. 276-285.
- [4] Лопатин А.А., Габдуллина Р.А., Саегараев А.А., Куршев Е.Д. Теплоотдача трехмерных решетчатых конструкций, выполненных методом аддитивного лазерного спекания // Перспективы развития двигателестроения. — Самара : Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, 2025. — С. 437-439.
- [5] Маракулина М.Ю., Зайцева М.М., Топоев А.А., Князев С.В., Усольцев А.А. Аддитивные технологии получения металлоизделий // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. — Новокузнецк : СибГИУ, 2023. — С. 125-132.
- [6] Морточкин М.А. Развитие аддитивной промышленности в рамках импортозамещения // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. — Красноярск : СибГУ имени академика М. Ф. Решетнёва, 2025. — С. 1327-1329.
- [7] Об организации деятельности технического комитета по стандартизации «Аддитивные технологии» : Приказ Росстандарта от 28.02.2018 N 383 // СПС «КонсультантПлюс». — URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=715394> (дата обращения: 02.05.2026).
- [8] Патент № 2728894 С1 Российская Федерация, МПК G21C 3/30. Тепловыделяющая сборка ядерного реактора (варианты) : № 2020102355 : заявл. 22.01.2020 : опубл. 03.08.2020 / Аксенов П. М., Бондарь Ю. Н., Крылов А. Л., Суслин В.И., Козырев Р.Е., Лузан Ю.В., Кукушкин Ю.А. ; заявитель АО «ТВЭЛ», ПАО «Машиностроительный завод». — 16 с.
- [9] Патент № 2819324 С1 Российская Федерация, МПК F28D 9/04, B33Y 80/00. Пластинчатый теплообменник со спиралевидными турбулизаторами для газотурбинной установки : заявл. 10.01.2024 : опубл. 17.05.2024 / Шиманов А. А., Угланов Д. А., Шиманова А. Б., Благин Е.В., Елисеев И.А., Гаев Е.С. ; заявитель ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева». — 12 с.
- [10] Савченко В.В., Блинов В.Л., Шаманин С.Ю. Разработка экспериментального стенда осевого компрессора с использованием аддитивных технологий // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. аэрокосмическая техника. — 2021. — №. 64. — С. 33-42.
- [11] Сеньшина Т.А. Обзор применения аддитивных технологий в тепловых агрегатах с фазопереходными процессами и пути совершенствования их конструкции на основе этих технологий / Т.А. Сеньшина, А.Е. Холяков, Ю.В. Панин, Ю.П. Борщев // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. — 2023. — № 3. — С. 81-87.
- [12] Склезнев А.А., Лунев Е.Г. Применение элементов из термопластичных материалов и аддитивных технологий в конструкции космических аппаратов // Решетневские чтения. — Красноярск : СибГУ имени академика М. Ф. Решетнёва, 2025. — С. 232-235.
- [13] Соколов И.П., Ланчев А.Э., Тенишев Н.К. Аддитивные технологии // VIII молодежная конференция по управлению проектами. — Нижний Новгород : НГТУ, 2023. — С. 10-11.
- [14] Сысоев А.А. Additive technologies. What is a 3d printer? // Студент и наука (гуманитарный цикл) - 2022. — Магнитогорск : МГТУ им Г.И. Носова, 2022. — С. 819-823.
- [15] Рогалев А.Н. Шевченко М.И. Применение аддитивных лазерных технологий при проектировании охлаждаемых лопаток газовых турбин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — №. 3. — С. 34-39.
- [16] Усов Д.А., Мезенцев С.И., Кутузова Н.В. Аддитивные технологии в производстве регенеративных теплообменников // Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение YOUNG ISC 2024. — СПб. : ООО «Издательство «ЛЕМА», 2024. — С. 264.
- [17] Филиппов В.В. Аддитивные технологии в производстве регенеративных теплообменников //

Функциональные материалы: синтез. Свойства. Применение YOUNG ISC 2024. — СПб. : ООО «Издательство «ЛЕМА», 2024. — С. 264.

[18] An experimental investigation of indirect evaporative cooling in gyroid-based heat exchangers // ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431125014000> (дата обращения: 19.02.2026).

[19] Fernando Lomello, Lucie Bard, Mario Maglione, Frédéric Schuster PEPR DIADEM: Priority equipment and research program on the development of innovative materials using artificial intelligence // Computational and Structural Biotechnology Journal. — 2024. — №. 25. — С. 186-193.

[20] Hugh Chen, Samuel T. Hart, Álvaro Romero-Calvo Thermal propellant management devices for CubeSat cold gas propulsion // Acta Astronautica. — 2026. — №. 243. — С. 291-304.

[21] Numerical and experimental investigation of optimized heat sink designs for liquid cooling of a heterogeneous heating surface with multiple heat sources // ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072924006628> (дата обращения: 21.02.2026).

[22] Topology optimization, additive manufacturing and thermohydraulic testing of high-temperature heat exchangers // SSRN. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4932130 (дата обращения: 19.02.2026).

References:

[1] Abramov I.V. Problems of Additive Manufacturing Development in Russia in the Context of the Digital Transformation of the Economy // Organizational, Economic, and Innovative-Technological Problems of Modernizing the Russian Economy. Penza: Penza State Agrarian University, 2023, pp. 13-19.

[2] Kostin A.V., Agafonova I.V., Istomin K.G., Novatsky G.P., Ukolov D.S. Models of Heat Exchange Modules for a Research and Educational Stand // Current Aspects of the Development of Science and Society in the Era of Digital Transformation. Moscow, 2023, pp. 100-107.

[3] Kozhiev A.Yu. Russian Experience in Applying Additive Manufacturing Technologies in the Nuclear Industry // Current Issues of the Modern Economy. 2024, no. 11, pp. 276-285.

[4] Lopatin A.A., Gabdullina R.A., Saetgaraev A.A., Kurshev E.D. Heat transfer of three-dimensional lattice structures manufactured by additive laser sintering // Prospects for the development of engine building. - Samara: Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, 2025. - Pp. 437-439.

[5] Marakulina M.Yu., Zaitseva M.M., Topoev A.A., Knyazev S.V., Usoltsev A.A. Additive technologies for producing metal products // Science and youth: problems, searches, solutions. - Novokuznetsk: SibGIU, 2023. - Pp. 125-132.

[6] Mortochkin M.A. Development of the additive industry within the framework of import substitution // Young scientists in solving urgent problems of science. - Krasnoyarsk: Siberian State University named after Academician M. F. Reshetnev, 2025. - Pp. 1327-1329.

[7] On the organization of the activities of the technical committee for standardization «Additive technologies»: Order of Rosstandart dated 02.28.2018 N 383 // SPS «ConsultantPlus». - URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=715394> (date of access: 02.05.2026).

[8] Patent No. 2728894 C1 Russian Federation, IPC G21C 3/30. Nuclear reactor fuel assembly (variants): No. 2020102355: declared 22.01.2020: published 03.08.2020 / Aksyonov P. M., Bondar Yu. N., Krylov A. L., Suslin V. I., Kozyrev R. E., Luzan Yu. V., Kukushkin Yu. A.; applicant JSC TVEL, PJSC Machine-Building Plant. - 16 p.

[9] Patent No. 2819324 C1 Russian Federation, IPC F28D 9/04, B33Y 80/00. Plate heat exchanger with spiral turbulators for a gas turbine unit: declared 10.01.2024: published 17.05.2024 / Shimanov A. A., Uglanov D. A., Shimanova A. B., Blagin E. V., Eliseev I. A., Gaev E. S.; applicant FGAOU VO «Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev». - 12 p.

[10] Savchenko V. V., Blinov V. L., Shamanin S. Yu. Development of an experimental stand for an axial compressor using additive technologies // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering. - 2021. - No. 64. - P. 33-42.

[11] Senyshina T. A. Review of the application of additive technologies in thermal units with phase transition processes and ways to improve their design based on these technologies / T. A. Senyshina, A. E. Kholyakov, Yu.V. Panin, Yu.P. Borshchev // Bulletin of the S.A. Lavochkin Scientific and Production Association. - 2023. - No. 3. - P. 81-87.

[12] Skleznev A.A., Lunev E.G. Application of Elements from Thermoplastic Materials and Additive Technologies in Spacecraft Design // Reshetnev Readings. - Krasnoyarsk: Siberian State University named after Academician M.F. Reshetnev, 2025. - P. 232-235.

[13] Sokolov I.P., Lanchev A.E., Tenishev N.K. Additive Technologies // VIII Youth Conference on Project Management. - Nizhny Novgorod: NSTU, 2023. - P. 10-11.

[14] Sysoev A.A. Additive Technologies. What is a 3D Printer? // Student and Science (Humanities) - 2022. — Magnitogorsk: Bauman Moscow State Technical University, 2022. — P. 819-823.

=====

[15] Rogalev A.N. Shevchenko M.I. *Application of Additive Laser Technologies in the Design of Cooled Gas Turbine Blades* // *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. — 2016. — No. 3. — P. 34-39.

[16] Usov D.A., Mezentsev S.I., Kutuzova N.V. *Additive Technologies in the Production of Regenerative Heat Exchangers* // *Functional Materials: Synthesis. Properties. Application YOUNG ISC 2024*. — St. Petersburg. : ООО «Izdatelstvo «LEMA», 2024. - P. 264.

[17] Filippov V.V. *Additive technologies in the production of regenerative heat exchangers* // *Functional materials: synthesis. Properties. Application YOUNG ISC 2024*. - St. Petersburg. : ООО «Izdatelstvo «LEMA», 2024. - P. 264.

[18] *An experimental investigation of indirect evaporative cooling in gyroid-based heat exchangers* // *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431125014000> (date of access: 19.02.2026).

[19] Fernando Lomello, Lucie Bard, Mario Maglione, Frédéric Schuster *PEPR DIADEM: Priority equipment and research program on the development of innovative materials using artificial intelligence* // *Computational and Structural Biotechnology Journal*. - 2024. - No. 25. - pp. 186-193.

[20] Hugh Chen, Samuel T. Hart, Álvaro Romero-Calvo *Thermal propellant management devices for CubeSat cold gas propulsion* // *Acta Astronautica*. - 2026. - No. 243. - pp. 291-304.

[21] *Numerical and experimental investigation of optimized heat sink designs for liquid cooling of a heterogeneous heating surface with multiple heat sources* // *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072924006628> (дата обращения: 21.02.2026).

[22] *Topology optimization, additive manufacturing and thermohydraulic testing of high-temperature heat exchangers* // *SSRN*. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4932130 (дата обращения: 19.02.2026).





ЮРКОМПАНИ
www.law-books.ru

Юридическое издательство «ЮРКОМПАНИ»
издает научные журналы:

- Научно-правовой журнал «Образование и право», рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования России (специальности 12.00.01, 12.00.02), выходит 1 раз в месяц.
- Научно-правовой журнал «Право и жизнь», рецензируемый (РИНЦ, E-Library), выходит 1 раз в 3 месяца.