

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 6 (180). С. 21-30.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 6 (180). P. 21-30.

Научная статья
УДК 658.5.011:621.9.04:004.896
doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-21-30

Технологическая подготовка производства: проблемы и перспективы использования искусственного интеллекта

Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.
Наталья Вячеславовна Чигиринская², д.п.н.
Дмитрий Вадимович Крайнев³, к.т.н.
Жанна Сергеевна Тихонова⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, Россия

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

² nvtchi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2535-5089>

³ krainevdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8762-4251>

⁴ tikhonovazhs@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5047-0244>

Аннотация. Рассмотрена структура технологической подготовки производства (ТПП) машиностроительных предприятий в соответствии с ГОСТ Р 50995.3.1-96. Показано, что распределение трудозатрат по трем укрупненным этапам ТПП (концептуальное проектирование, детализация и обработка, постановка на производство) согласуется с принципом Парето: 20 % времени, затраченных на концептуальные решения (выбор структуры производства, технологических маршрутов, баз и схем базирования), определяют 80 % эффективности производства и себестоимости будущего изделия. Предложена классификация проектных задач ТПП по степени формализованности (формализованные, частично формализованные, неформализованные). Для каждого класса задач определены существующие (вычислительные алгоритмы, информационный поиск, эвристика) и перспективные (нейросетевые и графовые методы, гибридные экспертные системы, большие языковые модели) методы автоматизации. Рассмотрены этапы отраслевой адаптации и внедрения систем искусственного интеллекта (ИИ) в практику технологических служб на начальных этапах подготовки производства. Проанализированы объективные (неопределенность данных, требования безопасности) и субъективные (неоднозначная терминология, юридическая ответственность) барьеры внедрения ИИ в ТПП. Сформулированы ближайшие (RAG-ассистенты – поиск прототипов и верификация технико-технологических решений, разработанных в соответствии с принципами типового проектирования – для частично формализованных задач) и отдаленные (генеративное проектирование техпроцессов, автоматическая верификация технико-технологических решений, интеграция с цифровыми двойниками производства) перспективы использования больших языковых моделей (LLM) – для частично формализованных и неформализованных задач, таких как, например, оптимальное маршрутное проектирование с учетом комплексного обеспечения качества обработанной поверхности по параметрам микрогеометрии и физико-механических характеристик поверхностного слоя или прогнозирование накопленной погрешности при проектировании последовательности перемены баз.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, технологическое проектирование, классификация проектных задач, уровень формализации, перспективы автоматизации ТПП, искусственный интеллект, большие языковые модели (LLM)

Для цитирования: Чигиринский Ю.Л., Чигиринская Н.В., Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С. Технологическая подготовка производства: проблемы и перспективы использования искусственного интеллекта // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 6 (180). С. 21–30. doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-21-30

Technology process planning: problems and prospects of using artificial intelligence

Yuliy L. Chigirinsky¹, D. Eng.

Natalia V. Chigirinsky², D. Eng.

Dmitry V. Krainev³, PhD. Eng.

Zhanna S. Tikhonova⁴, PhD. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² nvtchi@yandex.ru

³ krainevdv@mail.ru

⁴ tikhonovazhs@yandex.ru

Abstract. the structure of technology process planning (TPP) of machine-building enterprises in accordance with the State Standard (GOST) R 50995.3.1-96. is viewed. It is shown that the distribution of labor costs across the three enlarged stages of TPP (conceptual design, detailing and testing, production) is consistent with the Pareto principle: 20 % of the time spent on conceptual decisions (choosing the production structure, technological routes, bases and basing schemes) determine 80 % of the production efficiency and cost of the future product. The classification of TPP project challenges according to the degree of formalization (formalized, partially formalized, non-formalized) is proposed. For each class of tasks, existing (computational algorithms, information search, heuristics) and promising (neural network and graph methods, hybrid expert systems, large language models) automation methods are found. The stages of industry adaptation and implementation of artificial intelligence (AI) systems in the practice of engineering-technological services at the initial stages of preproduction are given consideration. Objective (uncertainty of data, security requirements) and subjective (ambiguous terminology, legal responsibility) barriers the AI adoption for TPP are analyzed. The immediate (RAG assistants – search for prototypes and verification of technical and technological solutions developed in accordance with the principles of standard design – for partially formalized tasks) and long-term (generative design of technical processes, automatic verification of technical and technological solutions, integration with digital counterparts of production) prospects for the use of large language models (LLM) are formulated for partially formalized and non-formalized tasks, such as, for example, optimal route design, taking into account comprehensive quality assurance of the treated surface according to microgeometry parameters and physico-mechanical characteristics of the surface layer, or predicting accumulated errors in the design of the sequence of base changes.

Keywords: technology process planning, classification of project challenges, level of formalization, prospects for automation of TPP, artificial intelligence, large language models (LLM)

For citation: Chigirinsky Yu.L., Chigirinsky N.V., Krainev D.V., Tikhonova Zh.S. Technology process planning: problems and prospects of using artificial intelligence / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 6 (180). P. 21–30. doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-21-30

Рассмотрим вопросы, определяющие возможность совершенствования традиционной технологической подготовки машиностроительного производства (ТПП). Базовые понятия, структура, содержание и взаимосвязь проектных задач, составляющих ТПП закреплены в нормативных документах [1, 2] и являются устоявшимися в профессиональной среде [3]. Нормативные документы определяют укрупненные разделы ТПП (табл. 1), оставляя решение о последовательности их выполнения и содержании задач каждого этапа за руководителями технологической службы предприятия.

Определим содержание ключевых терминов в рамках данного исследования:

«Конструктор» – условный специалист (или группа специалистов), в функции которого входит разработка конструкции изделия, назначение технических требований в отношении точности и качества отдельных элементов. Можно говорить о разработке, в определенном смысле, геометрической и функциональной модели изделия.

«Технолог» – условный специалист (или группа специалистов), в функции которого входит гарантированное обеспечение

выполнения технических требований, сформулированных конструктором – «овеществление» модели изделия. В зависимости от состава решаемых проектных задач и этапа ТПП условный «технолог» может выполнять функции конструктора специальной технологической

оснастки, технолога инструментального или заготовительного производства, нормировщика, специалиста по управлению качеством. Сложившиеся традиции отечественного производства предполагают весьма широкий спектр задач, решаемых технологом.

1. Этапы ТПП в соответствии с ГОСТ Р 50995.3.1-96 [1]

1. TPP stages in accordance with the State Standard (GOST) R 50995.3.1-96 [1]

Этап	Содержание работ
Общее укрупненное проектирование производства	Формирование определяющих технологических и организационных решений по производству изделия
Детализация и отработка принципиальных технологических решений	Детальная, подробная, проработка и корректировка маршрутно-операционной технологии, техническое и временное нормирование, инструментальное обеспечение, уточненные режимы обработки, проектирование и отладка технологической оснастки, ..., выпуск опытной партии изделий.
Постановка на производство (серия)	Окончательная отработка и документальное оформление технологических процессов для стабильного выпуска

На первом этапе закладываются основные принципы будущего производства. Определяющими вопросами являются отработка конструкции изделия на технологичность, определение «узких мест» конструкции – поверхностей, наиболее точных, чистых, сложных по геометрической форме, взаимному расположению, особенностям поверхностного слоя, элементов конструкции изделия, диктующих выбор методов обработки и принципиальных схем изготовления. Именно на этом этапе технолог формирует укрупненную структуру технологии, определяя перечень критичных операций, выбирая базы и последовательность перемены баз. Результаты укрупненного анализа трудозатрат [4] на решение задач первого этапа, как правило, отводится 15...20 % общей трудоемкости ТПП. Второй этап включает решение традиционных, в достаточной степени «рутинных», задач, связанных с подробным расчетным обоснованием принципиальных решений, принятых на предыдущем этапе. Следует отметить, что именно эти проектные задачи занимают основное время ТПП по некоторым [4, 5] оценкам до 60...65 %, поскольку включают не только проектные работы, но и

отладку инженерных решений. Третий этап предполагает масштабирование опытного производства до «промышленной серии» и подробное документирование всех этапов ТПП и разработанных проектных решений. На выполнение действий этого этапа приходится, соответственно, 15...25 % общего времени. Такое распределение времени согласуется с анализом общих рекомендаций ЕСТПП [1, 2] на выполнение проектных работ и документирование 60...70 % времени; на изготовление технологической оснастки и специального инструмента 20...30 %; на производство опытной партии и доведение производства до уровня промышленной серии – не более 10...15 %.

Стандарт [1] отдельно подчеркивает необходимость совмещения стадий разработки и подготовки производства. Это означает, что технолог должен включаться в работу не тогда, когда рабочий чертеж уже готов, а на этапе конструкторской подготовки. На практике, как правило, все три этапа выполняются параллельно, с небольшим смещением начала каждого следующего этапа по времени (рис. 1), чтобы сократить длительность всего цикла ТПП.

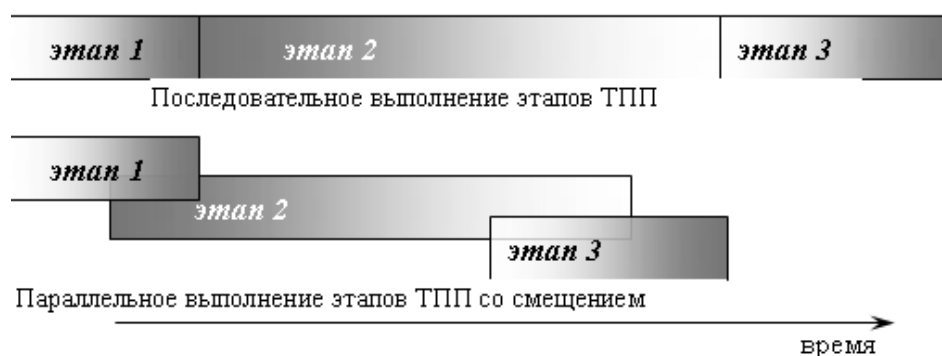


Рис. 1. Совмещение этапов ТПП по времени

Fig. 1. Timing of the TPP stages

Тем не менее, приведенное распределение отражает реальную структуру трудозатрат: больше всего ресурсов (и времени) уходит на выполнение проектных работ, а не на изготовление оснастки и отладку производства.

Результаты анализа трудозатрат [2, 4, 5] в достаточной степени согласуются с известным «принципом Парето»: 20 % затраченных усилий обеспечивают 80 % результата. В ТПП именно концептуальные решения, полученные на первом этапе способ организации производства, маршрутная технология, базы, – будут определять результативность и эффективность производства. Решение задач второго и третьего этапов ТПП, требующее основных затрат времени и ресурсов, имеет смысл только том случае, когда на первом этапе технолог не допустил концептуальных ошибок. Отметим, что на практике, как правило, проверка корректности решения задач первого этапа производится в условиях опытного производства, т. е., на завершающих стадиях второго этапа тогда, когда потрачено более 75 % ресурсов – временных, материальных, энергетических и т. д.

В качестве промежуточного итога проведенного анализа можно отметить следующее: автоматизация технологической подготовки производства должна быть ориентирована в первую очередь на поддержку принятия решений на этапе выбора принципиальной структуры, маршрутов и баз, где цена ошибки максимальна. Ранее [6] мы проводили сравнительный анализ функциональных возможностей программных средств САПР ТП, наиболее часто применяемых на отечественных машиностроительных предприятиях. Было установлено, что большинство систем автоматизации проектирования максимально ориентировано

на решение задач второго этапа (табл. 1) подготовки производства.

Возможность автоматизации решения проектных задач ТПП

Расширим традиционную [6] классификацию инженерных задач в САПР по с учетом потенциальных возможностей современных информационных систем:

- формализованная задача (традиционное понимание) – синонимы: детерминированная, вычислительная, определяется следующим комплексом признаков: в качестве исходных данных используется структурированный набор чисел; решение описывается математическим алгоритмом; результат решения – структурированный набор чисел; свойство детерминированности гарантирует, что при одинаковых исходных данных результат всегда однозначен и не зависит от количества запусков;

- неформализованная задача (традиционное понимание): исходные данные – произвольный по объему и структуре набор величин, не обязательно числовых; не все процедуры решения могут быть описаны математически; результат – множество (счетное и, как правило но не обязательно, конечное) различных решений, формально «правильных», соответствующих условиям, сформулированным в исходных данных;

- частично формализованная задача (новая трактовка термина) – подмножество неформализованных, для которых эффективны декомпозиция и информационный поиск с жесткими критериями. Они выделены из традиционного класса «неформализованных»

для уточнения методов автоматизации.

Отметим, что класс «частично формализованных» задач предлагается как результат расщепления традиционного класса задач «неформализованных». В предлагаемой классификации термин «неформализованная» задача приобретает новое, более узкое смысловое содержание – инженерные задачи с неоднозначностью исходных данных и результатов, для решения которых не применимы методы информационного поиска с жестко заданными

критериями. Отметим также, что разделение проектных задач ТПП на названные классы не является строго детерминированным, поскольку границы классов могут изменяться в зависимости от условий и технологических традиций конкретного производства, а также в зависимости от расширения функциональных возможностей средств автоматизации проектирования. Краткая оценка возможных методов решения проектных задач ТПП приведена в табл. 2.

2. Методы решения проектных задач

2. Methods of solving project challenges

Класс задач	Существующие методы	Перспективные методы
Формализованные	вычислительные алгоритмы; прикладное ПО (CAD / CAM / CAE)	увеличение производительности; повышение точности; визуализация
Частично-формализованные	информационный поиск; фильтрация по атрибутам; деревья решений	нейросети, графовые методы, нечёткая логика, гибридные экспертные системы
Неформализованные	Эвристика технолога	LLM, системы поддержки решений

Решение формализованных задач составляет основу программного обеспечения современных систем автоматизации конструкторско-технологического проектирования. С учетом сформулированного выше тезиса о «раннем включении» технолога в процесс подготовки производства на этапе разработки конструкторской документации, формирования и согласования технических требований к изделию, разделение понятий САПР К и САПР ТП теряет актуальность. Детерминированные вычислительные алгоритмы и построенное на их основе программное обеспечение используется для решения задач геометрического моделирования (двумерного для построения чертежей и трехмерного поверхностного для объемной визуализации – в САД системах), при выполнении инженерных расчетов с использованием численных методов на основе твердотельных моделей (CAE системы), при моделировании обработки (CAM системы), для решения задач технического нормирования, формирования документации. В качестве направлений развития методов решения

формализованных задач можно назвать повышение производительности и точности вычислений на ближайшую перспективу; совершенствование алгоритмов приближенных вычислений с адаптивным (автоматически изменяемым) шагом сетки и развитие алгоритмов символьной математики в дальнейшем. Роль технолога при решении формализованных задач может быть сведена к контролю целостности и корректности исходных данных и результатов проектирования, принятию решений.

Методы решения частично формализованных проектных задач в программно-информационных средствах автоматизированного проектирования реализуются рациональным сочетанием процедур, выполняемых специалистом – декомпозиция комплексной инженерной задачи на элементарные подзадачи, решаемые либо вычислительными методами, либо методами информационного поиска и выбор средств решения элементарных задач, и собственно процедур проектирования, выполняемых автоматизированной системой. Структурированные информационные массивы и

соответствующие программные модули для построения формальной классификации данных о средствах, объектах и методах проектирования реализованы в виде, как правило, реляционных баз данных. Общее направление развития методов решения частично формализованных задач можно определить, как переход от поиска по точному совпадению атрибутов к поиску по смыслу и геометрической аналогии. Отметим работы, связанные с методами нечеткой логики [7]; исследования в области применения графового представления [7, 8] конструкторской (формальное описание взаимосвязей между отдельными поверхностями) и технологической (геометрическая точность формы и размеров, погрешности взаимного расположения, качество поверхности) структуры сложного изделия. Ключевые задачи технолога – построение системы взаимосвязей проектных задач, обоснованный выбор критериев, оценка результатов, принятие решений.

При решении неформализованных задач основные, не всегда четко определенные, проектные процедуры выполняет непосредственно инженер, использующий собственные, как правило, слабо формализованные, знания. Наиболее значимыми критериями обоснованности результатов решения является интуиция («мне так кажется», «меня так учили») специалиста и корпоративные («мы всегда так делали») традиции. Базовый метод решения неформализованных задач на современном этапе развития информационных технологий можно определить понятием «эвристика». Средства автоматизации проектирования используются в качестве пассивных, статических справочных систем, фактически представляя собой «электронную тетрадь для записей». Развитие информационных средств решения неформализованных задач возможно, в первую очередь, в направлении обоснованного применения искусственного интеллекта [9 – 11]. В частности, можно определить перспективные методы:

– использование больших языковых моделей (Large Language Model, LLM) в качестве «консультанта» для логического анализа технического задания, поиска различного рода несоответствий в постановках проектных задач; в дальнейшем – для рекомендации неочевидных решений на основе обученной «интуиции»;

– решение проектных задач на основе прецедентов (Case-Based Reasoning, CBR) – фактически, интеллектуальная трансформация методов типового проектирования, предполагающая отказ от жесткого формального описания критериев поиска прототипа;

– виртуальная симуляция проектируемого процесса, использование цифровых двойников при поиске оптимального решения методом проб и ошибок;

– синтез технико-технологических решений по неформальному описанию требований к результату – генерация гипотез с обязательной проверкой технологом.

Отметим, что во всех названных ситуациях окончательное решение принимает специалист – в нашем случае, технолог.

Базовые понятия

Искусственный интеллект (ИИ) – технологии, позволяющие компьютерным системам выполнять задачи, традиционно требующие человеческого интеллекта (обучение, принятие решений, распознавание).

Нейронная сеть – способ организации вычислений, где отдельный нейрон не содержит единицы информации, а информация формируется как комплекс свойств в момент запроса.

Большая языковая модель (LLM) – тип нейронной сети, предназначенный для выявления статистических закономерностей определенного языка, построения и постоянного обновления системы связей между отдельными нейронами. Процесс генерации новых нейронов и обновление связей между ними называют процессом обучения сети. Применительно к рассматриваемым в нашем исследовании задачам наиболее важным следует считать именно понятие «обучение», поскольку основой ТПП является профессиональный язык, терминологическое содержание и правила которого закреплены в соответствующей нормативной документации [1 – 3]. Терминологическая система ЕСТПП представляет собой трёхуровневую модель профессионального языка: лексический уровень, включающий терминологические стандарты (ГОСТ 14.004-83 и др.), задающие контролируемый словарь предметной области; синтаксический, определяющий

формальную грамматику документов (ЕСТД); поисковый – описание (ГОСТ 14.407-75) процедур подготовки, хранения и извлечения технологической информации в САПР. В рамках данного исследования под LLM (модель, система) понимается программная система, реализующая функции искусственного интеллекта применительно к задачам работы с технологическим текстом. Аналогично, определяя границы масштабирования системы, термин «предприятие» будем использовать для обозначения производства, работающего в едином информационном пространстве по единым нормативным документам в конкретных случаях, может быть государственная корпорация, концерн, группа предприятий, отдельное предприятие или структурное подразделение предприятия.

Обучение современных LLM включает три этапа: предварительное обучение (Pre-training), тонкая настройка (Fine-tuning), обучение с подкреплением (Reinforcement Learning) [9]. Существенно различающихся по ресурсоемкости (данные приведены по результатам статистического анализа открытых информационных ресурсов, преимущественно зарубежных и, как правило, нерцензируемых – авторы данного исследования выступили в качестве data engineers [9] – специалистов по сбору и «очистке» первичной информации:

- на предварительное обучение расходуется до 60...85 % материальных и финансовых ресурсов; затраты времени по различным источникам, могут составлять отб месяцев до 1,5 лет и более; этап выполняется однократно при создании системы;

- выполнение тонкой настройки требует участия высококвалифицированных специалистов в предметной области (в рассматриваемом случае технологов машиностроительного производства) обладающих, также, высокой квалификацией в области информационных технологий в частности, программирования; материальные и финансовые затраты могут составлять 10...25 %, временные – до нескольких месяцев; работы выполняются однократно для каждого предприятия;

- третий этап – обучение с подкреплением, требует участия предметных специалистов предприятия, обеспечивающих первичную «настройку», а в дальнейшем,

перманентное циклическое обновление и актуализацию информации; разовые материальные и финансовые затраты могут составлять 5...15 %, временные – до нескольких недель.

Следует учитывать, что все три этапа обеспечивают создание языковой модели «с нуля». На практике, для большинства инженерных задач, в том числе и для задач технологической подготовки производства, достаточно двух завершающих этапов. На этапе «тонкой настройки» в систему загружается «оцифрованный» массив «постоянной» информации, сведения из документов технологического и конструкторского архивов, данные об используемом оборудовании. Этап «обучения с подкреплением» необходим для периодической актуализации в системе сведений о текущем состоянии производства. На этих этапах формируется инвариантная система, единая для всех пользователей предприятия.

После начала эксплуатации системы, каждый конкретный пользователь формирует свое уникальное отображение языковой модели. Следует учитывать, что уникальность модели формируется не для пользователя, а для каждой самостоятельной серии «вопрос-ответ» – все связи, которые система создает в таком диалоге, существуют только во время обращения к этому диалогу и не сохраняются в едином информационном пространстве системы. Период эксплуатации системы пользователем (технологом) для решения проектных задач не имеет отношения к этапам обучения. Такая «оперативная имитация» обучения – технолог видит, что система постепенно «адаптирует» содержание и языковой стиль ответов под запросы, определяется как «механизм контекстной подстройки без изменения весов модели» или «RAG (Retrieval-Augmented Generation)». Система анализирует запрос, выделяет содержательную информацию, находит соответствующие цитаты в корпоративной информационной базе и выстраивает ответ, обязательно указывая источники цитирования. Новая информация в системе при этом не сохраняется. В качестве дополнительного эффекта можно назвать неочевидную для технолога необходимость постоянного повышения степени формализованности своих запросов к системе, технолог вынужден учиться.

Очевидные проблемы промышленного использования LLM

Ограничения, препятствующие «моментальному» внедрению систем искусственного интеллекта в практику технологической подготовки машиностроительного производства, можно разделить на следующие категории:

Объективные барьеры, определяемые явными и скрытыми проблемами существующей системы ТПП:

- устаревание нормативной базы: большая часть нормативных документов ЕСТД не предполагает необходимости (заметьте, и возможности) постоянного обновления содержательного контента в ГОСТ Р 59192-2020 и ГОСТ Р 57412-2025 отсутствуют конкретные рекомендации в отношении логической структуры, форматов наборов данных на электронных носителях и структуры и внешнего вида печатных форм технологических документов;

- неоднозначность и статистическая неопределенность [12] данных, диктующие необходимость постоянного обновления корпоративных информационных массивов;

- недостаточная достоверность и точность информации и, как следствие, слабое доверие к рекомендациям системы: «галлюцинации» языковых моделей, которые возникают при эксплуатации LLM, недопустимы в ТПП – каждое положение, генерируемое ИИ должно быть подтверждено проверяемыми ссылками на первоисточник (ГОСТы, математическую модель, производственный прецедент);

- требования информационной безопасности: данные о технологиях, в особенности на предприятиях ОПК представляют собой информацию ограниченного доступа и не могут храниться в «облаке» как следствие, необходимо создание локальных решений.

Неочевидные и, во многом, субъективные проблемы:

- внедрение ИИ в технологическую подготовку производства требует пересмотра сложившихся «ролей» внутри службы главного технолога предприятия: расширение компетенций исполнителей и сокращение ожиданий (в плане сиюминутной отдачи) руководителей;

- проблема «юридической

ответственности»: кто виноват в бракованной продукции, ИИ, сгенерировавший технологию, или технолог, поставивший в документах утверждающую визу.

- проблема неоднозначной терминологии: один и то же конструктивный элемент детали в различных проектных документах может иметь разные названия, технолог понимает, о чем идет речь в конкретном документе, а для корректной работы системы контекстной подстройки RAG необходимы жесткие формализованные правила;

- проблема обновления корпоративной базы знаний: корректность работы RAG-системы определяется актуальностью её информационной базы – в штатных расписаниях технологических служб не предусмотрен специалист «по управлению технологическими данными»;

- проблема «интерфейса и психологии»: LLM + RAG не предусматривают одношагового решения комплексной задачи проектирования техпроцесса и требуют от пользователя определенной культуры (строгость, жесткая формализация, однозначность) работы с запросами;

- проблема «ложной экономии»: внедрение ИИ не дает сиюминутной прибыли, поскольку не заменяет технолога (от специалиста требуется расширение профессиональных компетенций) и не допускает сокращения инженерного корпуса, требуются новые специалисты (инженеры по работе с данными, AI-тренеры).

Перспективы развития информационных средств автоматизации ТПП

Говоря о вероятных направлениях развития информационных средств автоматизации технологического необходимо учитывать, что технологическая подготовка производства представляет собой область деятельности с жесткими требованиями к детерминизму технических и технологических решений, точности и достоверности результатов проектирования, однозначности терминологии, гарантированной безопасности результатов проектирования. Исходя из этого можно сформулировать перспективы промышленного использования систем искусственного интеллекта в

машиностроительном производстве на ближайшее и отдаленное будущее.

Ближайшие перспективы – модернизация существующих технологий проектирования:

– RAG-системы для работы с нормативной документацией в качестве интеллектуального ассистента технолога для работы, в том числе, аналитической, с нормативно-справочной документацией;

– поиск технологических прототипов и генерация черновиков маршрутно-операционных технологий по геометрической модели изделия и нестрогому текстовому описанию (графическая база данных + CAD + LLM);

– интеллектуальная помощь при выборе баз и схем базирования, автоматизированная верификация технологических решений и рекомендации по решению обнаруженных при верификации проблем (LLM + детерминированные расчетные модули).

Отдаленные перспективы:

– генеративное проектирование маршрутно-операционных технологий по заданной геометрической модели изделия и системе ограничений на базе LLM, интегрированной с физическими симуляторами (конечно-элементный анализ, моделирование процессов обработки, в том числе регрессионное, учитывающее неопределенность технологической информации)

– автоматическая верификация технологий на полноту описания, техническую корректность, оптимальность;

– интеграция с цифровыми двойниками производства.

Заключение

Проведенный анализ показал, что современная ТПП характеризуется высоким уровнем неопределенности технологической информации, обусловленной вариабельностью свойств материалов, противоречивостью справочных данных и неполнотой сведений о состоянии оборудования.

Предложенная классификация задач ТПП по степени математической формализованности позволила дифференцировать области применения ИИ. Классические

вычислительные методы сохраняют приоритет в детерминированных задачах. Задачи простого информационного поиска эффективно решаются методами теории множеств с использованием структурированных информационных массивов.

Установлено, что ключевой областью применения ИИ в ТПП является класс обратных задач верификации – проверка корректности эвристических решений технолога.

Перспективными направлениями формализация неявных технологических знаний, гибридные экспертные системы и адаптация LLM для интерпретации конструкторской документации с учётом контекста производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **ГОСТ Р 50995.3.1-96.** Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства: Введ. 01.07.1997. М.: Госстандарт России, 1997. 20 с.

2. **ГОСТ Р 71801-2024.** Система технологической подготовки производства. Виды, комплектность и правила оформления документов: Введ. 01.02.2025. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 28 с.

3. **Справочник технолога /** под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

4. **Костюков В.Д.** Перспективная модель решения общих вопросов ТПП // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 1 (165). С. 43–54.

5. **Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю.** Обеспечение эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий машиностроения и приборостроения // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 12 (66). С. 28–34.

6. **Чигиринский Ю.Л.** Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 8 (110). С. 29–35.

7. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С.** Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства // Научные технологии в машиностроении. 2024. 4 (154). С. 29–40. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40.

8. **Бочкарев П.Ю.** Методические принципы структурированной унификации информационного обеспечения технологической подготовки механообрабатывающих производств // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 8 (170). С. 41–48. DOI 10.30987/2223-4608-2025-8-41-48.

9. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход = Artificial Intelligence:

а Modern Approach / Пер. с англ. и ред. К.А. Птицына. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1408 с. ISBN 5-8459-0887-6.

10. **Черепанов Н.В., Буслаев С.П.** Проблемы и задачи развития искусственного интеллекта на машиностроительном предприятии // Инновации и инвестиции. 2021. № 7. С. 175–179.

11. **Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р.** Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 39–48.

12. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В.** Управление неопределенностью технологической информацией в цифровом производстве // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 23–31. DOI: 10.30987/2223-4608-2025-7-23-31.

REFERENCES

1. State Standard (GOST) R 50995.3.1-96. Engineering support for product development. Technology process planning: Introduction. 07/01/1997. Moscow: Gosstandart of Russia, 1997. p. 20.

2. State Standard (GOST) 71801-2024. The system of technology process planning. Types, completeness and rules of registration of documents: Introduction. 01.02.2025. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2024. p. 28.

3. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. M.: Innovation Mechanical Engineering, 2019, 800 p.

4. Kostyukov V.D. Promising model for solving general issues of the Chamber of Commerce and Industry // Information technologies in design and production. 2017. No. 1 (165). pp. 43–54.

5. Nazariyev A.V., Bochkarev P.Yu. Assurance of efficient assembly operations carrying out of products of

mechanical engineering and instrument making // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2016. No. 12 (66), pp. 28–34.

6. Chigirinsky Yu.L. Current state and trends in development of technological engineering preproduction // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020. No.8 (110). pp. 29–35.

7. Chigirinsky Yu.L., Kraineva D.V., Tikhonov J.S. Transformation of the information structure as a tool for efficiency increase in high-variety production // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024. 4 (154). pp. 29–40. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40.

8. Bochkareva P.Yu. Methodological principles of structured unification of information support for technological training of machining industries // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025. No. 8 (170). pp. 41–48. DOI 10.30987/2223-4608-2025-8-41-48.

9. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: a Modern approach. Artificial Intelligence: a Modern Approach / Translated from English and edited by A. N. Ptitsyn. 2nd ed. Moscow: Williams, 2006. pp. 1408. ISBN 5-8459-0887-6.

10. Cherepanov N.V., Buslaev S.P. Problems and tasks of the development of artificial intelligence at a machine-building enterprise // Innovations and investments. 2021. No. 7. pp. 175–179.

11. Chigirinsky Yu.L., Ingemansson A.R. Technological aspects of digital machine-building production preparation // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2023. No. 9 (147). pp. 39–48.

12. Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V. Control of technological information ambiguity in digital production // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025. No. 7 (169). pp. 23–31. DOI: 10.30987/2223-4608-2025-7-23-31

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026; одобрена после рецензирования 14.05.2026; принята к публикации 27.05.2026.

The article was submitted 14.04.2026; approved after reviewing 14.05.2026; accepted for publication 27.05.2026.