

УДК 004.942

**И.А. ПОПОВ**, чл.-корр. АН Республики Татарстан, д-р техн. наук  
профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения – заведующий лабораторией  
моделирования физико-технических процессов<sup>1</sup>  
E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru

**В.М. ГУРЕЕВ**, д-р техн. наук  
ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования физико-технических процессов<sup>1</sup>  
E-mail: victor.gureev@kai.ru

**Ю.В. ЖУКОВА**, канд. физ.-мат. наук, доц.  
ведущий научный сотрудник лаборатории турбулентности<sup>2</sup>  
E-mail: julia\_zhukova@gambler.ru

**А.Д. ЧОРНЫЙ**, канд. физ.-мат. наук, доц.  
заведующий лабораторией турбулентности<sup>2</sup>  
E-mail: anchor@hmti.ac.by

**Т.А. БАРАНОВА**  
старший научный сотрудник лаборатории турбулентности<sup>2</sup>  
E-mail: bartat@tut.by

**И.Г. КУХАРЧУК**  
научный сотрудник лаборатории турбулентности<sup>2</sup>  
E-mail: doomer1979@mail.ru

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19.09.2025.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: ОТ КОНЦЕПЦИИ ДО СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*В статье рассматриваются ключевые аспекты применения цифровых технологий в машиностроении, охватывающие этапы проектирования и технологической подготовки производства. Описываются методы построения 3D-CAD-моделей, формирования конструкторской и технологической документации, создания виртуальных сборок и цифровых двойников с использованием 1D- и 3D-моделирования. Приведены примеры численных испытаний и практической реализации разработок на примере узлов и агрегатов дизельных двигателей для транспортных систем.*

**Ключевые слова:** цифровые технологии, декомпозиция, цифровые двойники, тепломассообмен, численное моделирование, верифицированная и валидированная физико-математическая модель, аэродинамика, прочность

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-15-22>

**Введение.** В современных условиях индустриальной революции 4.0 разработка и создание новых образцов техники, обладающих высокими экономическими, экологическими показателями и энергоэффективностью, значительно ускоряются. Этому способствует также высокая конкурентная борьба разработчиков и все больший переход на технологическую независимость и импортозамещение. Научно-технические работы (НИОКР, R&D (Research & Development), инжиниринг и ре-

инжиниринг) — вид деятельности, направленный на получение новых знаний и их практическое применение при создании новых образцов изделий или новых технологий. Для ускорения создания образцов новой техники при конструкторско-технологических работах в настоящее время широко применяются цифровые технологии, что предусматривает проведение ряда мероприятий: - разработка CAE- и CAD-моделей, а также конструкторской документации на основе 3D-скани-

рования конструкции базового изделия и последующей цифровой обработки данных;

- создание виртуальных сборок и проведение виртуальных испытаний;
- разработка компьютерных моделей и цифровых двойников (ЦД) [1–8], а также проведение виртуальных испытаний базовых конструкций, результаты которых позволяют восстановить их рабочие характеристики;
- оптимизация конструкции изделия и режимных параметров функционирования систем, разработка новых технических решений, изменение САД-моделей и обоснование внесенных изменений на основе результатов виртуальных испытаний;
- разработка рабочей конструкторской документации и технологических карт на новые образцы технических систем.

В Российской Федерации до 2021 года термин ЦД определялся как связанная совокупность компьютерных моделей различных видов, описывающих свойства и поведение экземпляра изделия, изменение его характеристик, протекающие внутри него процессы в зависимости от состояния внешней среды (управляющих воздействий), решаемых задач и условий их выполнения [8] с требуемым уровнем адекватности. При этом математическая, компьютерная или численная модель в [8] представлялась как математическая модель, в которой свойства объекта управления описываются системой уравнений, для которых нахождение решения осуществляется с использованием численных методов. Но в 2021 году, после принятия [7], суть понятия ЦД была сужена до системы, состоящей из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. При этом цифровая модель изделия — это система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям. Однако в мировой практике термин ЦД остается цифровой копией объекта, в которой воплощены все физические процессы в объекте и вокруг него. Как указано в [1], «...в технологии цифровых двойников наша цель — проектировать продукт виртуально, тестировать его виртуально, виртуально производить и обеспечивать виртуальную техническую поддержку. Мы хотим, чтобы все это выполнялось в рамках комплексного, целостного, кросс-дисциплинарного подхода». И только когда инженеры в ходе научно-технических разработок убеждаются, что цифровой двойник удовлетворяет всем техническим требованиям, осуществляется переход к реальному производству [2]. Остается

правомерным утверждение, что ЦД — это не цифровая тень изделия, когда изделие покрывается датчиками, в результате генерируется с большой скоростью и накапливается огромное количество структурированных и неструктурированных данных (Big Data), в которых шумы, ошибки и противоречия могут составлять до 90 %. ЦД — это математические модели высокого уровня адекватности, которые позволяют описывать с высокой степенью точности поведение объекта во всех ситуациях и на всех этапах жизненного цикла, включая аварийные сценарии; указывают критические зоны, где необходима установка датчиков [1–6], а также критические параметры и режимы функционирования изделия.

#### **Принципы построения задач при компьютерном моделировании технических устройств.**

Построение и решение задач строится на принципе декомпозиции будущей компьютерной модели или ЦД — методе разделения всего изделия на более простые, взаимосвязанные компоненты для упрощения разработки, анализа и управления, гибкости при моделировании, возможности параллельной разработки и лучшей интерпретируемости результатов. Суть принципа декомпозиции заключается:

- в разделении на уровни — цифровой двойник разбивается на иерархические уровни;
- модульности — каждый компонент моделируется и анализируется независимо, после чего интегрируется в общую систему;
- специализации — разные аспекты двойника (механика, термо- и аэрогидродинамика) могут быть декомпозированы на отдельные модели;
- масштабируемости — упрощает обновление и модификацию ЦД за счет работы с отдельными системами, узлами, процессами и изделиями.

Пример иерархической структуры построения компьютерной модели на примере дизельного двигателя показан в таблице.

Рассмотрим использование цифровых технологий на примере задачи по разработке систем и узлов дизельного двигателя [9–11]. В компьютерной модели или ЦД дизельного двигателя можно выделить кинематические, прочностные, аэрогидродинамические, тепловые модели. Для каждой модели выделяются свои уровни декомпозиции. Верхний уровень — системный — рассматривает интеграцию всех процессов, систем, узлов и агрегатов в изделие с учетом их взаимосвязи. Здесь проводятся оценки общих характеристик изделия на основе виртуальных испытаний и сравнительного анализа с результатами испытаний на натурном стенде. Подсистемный уровень включает ключевые системы изделия (рисунок 1). Компонентный уровень обеспечивает детализацию критичных элементов.

Построение компьютерных моделей требует надежных и полных исходных данных, базиру-

Таблица — Иерархическая структура построения компьютерной модели на примере дизельного двигателя  
 Table — Hierarchical structure of building a computer model using the example of a diesel engine

Системный уровень	Подсистемный уровень	Компонентный уровень	Тип модели	Моделируемые параметры
Дизельный двигатель	Корпус	Блок и головка блока цилиндров, элементы крепления	Прочностная	Нагрузки, термодеструкции, вибрации, прочность
	Цилиндро-поршневая группа и кривошипно-шатунный механизм	Коленвал, шатуны, поршни, пальцы поршня, кольца, вкладыши коренных и шатунных подшипников	Кинематическая	Нагрузки, термодеструкции, вибрации, износ, прочность
	Газораспределительный механизм	Распределительный вал, клапаны, шестерни, коромысло, подшипники распредвала и коромысла, толкатель		Фазы газораспределения, износ, термодеструкции, прочность
	Топливная система	Топливный насос, фильтр, клапаны, форсунки, топливопроводы, бак	Гидродинамическая	Давление, распыл, загрязнение
	Система охлаждения	Радиатор, помпа, термостат, трубопроводы и каналы	Тепловая и аэродинамическая	Температура, эффективность теплоотвода
	Система смазки	Маслозаборник, масляный насос, фильтры, каналы и магистраль, термостат, клапаны, форсунки		Давление масла, потери давления, загрязнение
	Система впуска/выпуска	Воздухозаборник, воздуховоды, турбокомпрессор, интеркулер, система рециркуляции газов, впускной и выпускной патрубки, катализатор, газовые каналы, клапана		Давление наддува, потери давления, распределение воздушного заряда, температура, балансы расходов
	Электроника и управление	Генератор, аккумулятор, провода, коммутаторы, электронный блок управления, датчики, приборы	Электрическая	Калибровка, потери напряжения, диагностика ошибок

ющихся на измерениях параметров в натуральных испытаниях или во время эксплуатации объекта. Однако происходящие процессы — быстропротекающие, и в ходе измерений определяются только интегральные параметры, осредненные во времени, например, эффективные показатели дизельного двигателя и параметры внешней скоростной характеристики.

Работа в реальном времени ставит задачу построения на основе моделей пониженного поряд-

ка (Reduced Order Model) цифровой тени или ЦД изделия. ЦД обычно используют:

- линейные многофакторные регрессии;
- полиномиальные регрессии (нейронные сети);
- 1D-модели.

1D-модели более физичны, чем построенные на нейросетевых методах моделирования. Для получения локальных и мгновенных значений параметров могут привлекаться методы 1D-моделирования, реализованные в таких пакетах программ, как AVL Boost [12, 13], Siemens AMESIM [14], MATLAB.

На рисунке 2 представлен пример расчетной схемы системы газообмена дизельного двигателя, которая построена с учетом глубокой декомпозиции по элементам системы и протекающим процессам. Полученный результат 1D-моделирования позволяет сформировать исходные данные для 3D-моделирования. Достоинством 1D-моделирования является то, что оно позволяет в режиме реального времени прогнозировать параметры сложных технических устройств и процессов, одновременно учесть все компоненты, узлы и агрегаты рассматриваемой системы, выявить и изучить их влияние на основные показатели, а также провести оптимизацию всей системы. Недостатком — высокая степень формализации, не позволяющая визуализировать реально протекающие

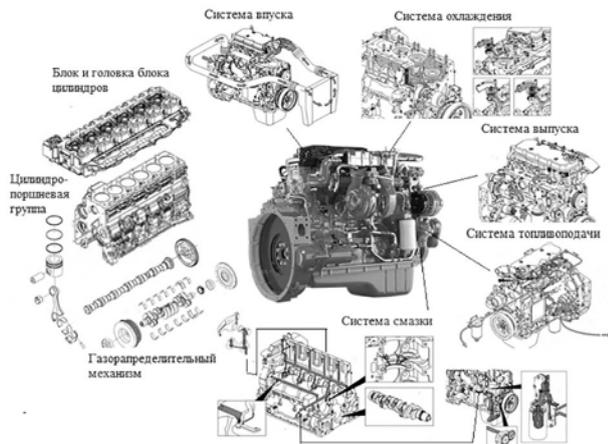


Рисунок 1 — Декомпозиция систем дизельного двигателя  
 Figure 1 — Decomposition of diesel engine systems

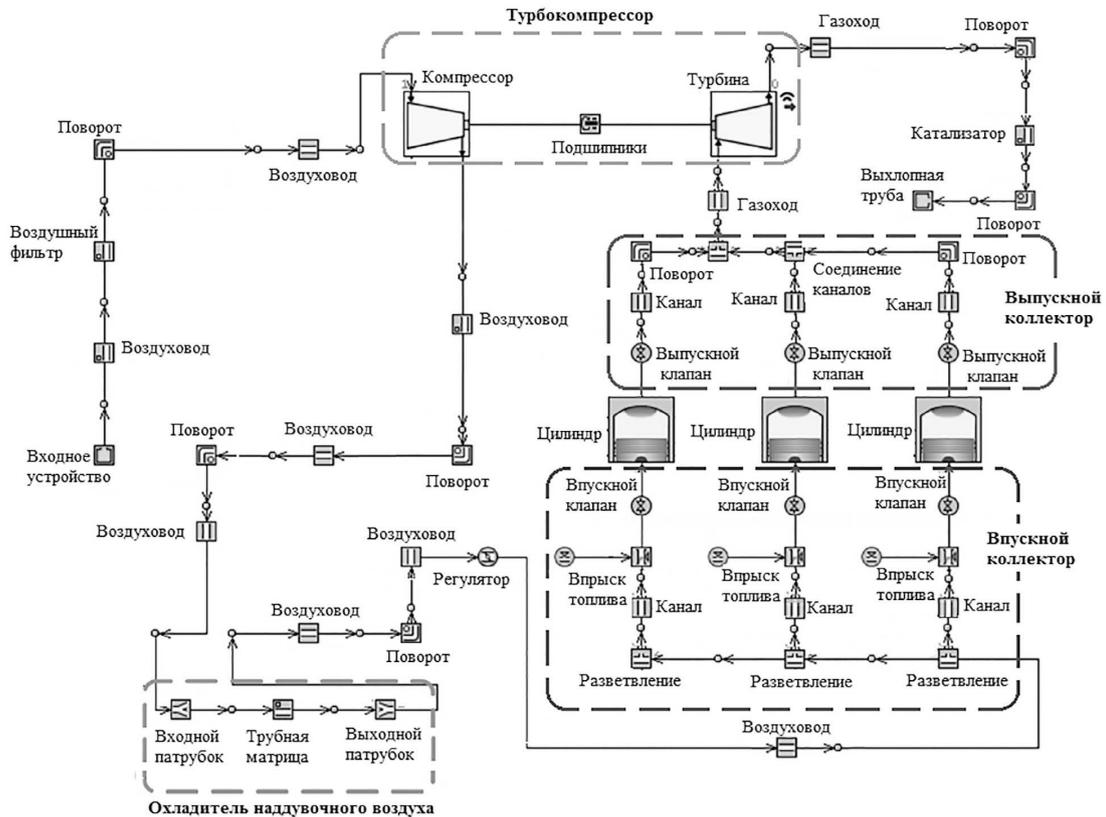


Рисунок 2 — Расчетная схема для 1D-моделирования системы газообмена дизельного двигателя  
 Figure 2 — Calculation scheme for 1D modeling of the gas exchange system of the diesel engine

процессы в отдельных узлах и агрегатах рассматриваемой системы, что успешно решается с использованием численного 3D-моделирования.

Многовариантные расчеты с использованием 3D-моделей позволяют накопить большой массив данных и обучить нейросетевые модели, основное преимущество которых — работа в реальном времени с мгновенной выдачей рекомендаций по оптимальным параметрам эксплуатации объекта, а недостатки — непрозрачность принятия моделью решения, невозможность визуализировать протекающие процессы.

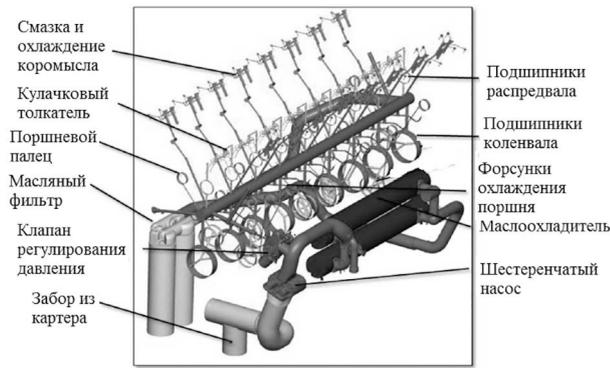
Компьютерные 3D-модели строятся на основе дифференциальных уравнений, замыкающих соотношений, граничных условий, зависимостей свойств материала изделия от температуры и давления. Важную роль играет выбор способа построения расчетных 3D-домена и сеток, а также решателя. Компьютерные 3D-модели не способны работать в реальном времени, но позволяют четко визуализировать происходящие аэродинамические и тепловые процессы, накопление термических напряжений, усталость материала и даже разрушения конструкций изделий, то есть точно и обоснованно определять критические места изделий, объяснять наблюдаемые процессы и явления и аргументировать выбор технических решений.

На рисунке 3 показана расчетная схема системы смазки дизельного двигателя для 3D-модели-

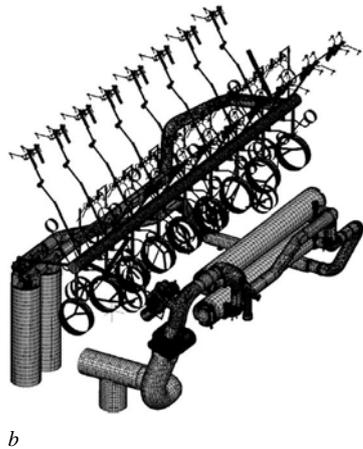
рования, результаты расчетов согласно которой представлены в [15–19].

**Компьютерные модели и цифровые двойники: их место в конструкторско-технологических работах.** Переход с натурного образца на цифровой аналог на стадии проектирования и первичных испытаний позволяет выявлять проблемы функционирования объекта без дорогостоящих и длительных натурных испытаний, а также производить доводку и оптимизацию объекта с целью повышения его эффективности, проверки технических решений, повышения надежности эксплуатации и разработки технологии производства.

Компьютерная модель состоит из 3D-CAD-модели, верифицированной и валидированной физико-математической модели всех процессов в узлах и агрегатах, набора режимных параметров и условий функционирования, критериев оптимальной эксплуатации, что позволяет проводить глубокий анализ процессов, в том числе быстротекающих, характеристики которых на натурных объектах невозможно измерить или визуализировать, но которые необходимы для оценки отдельных показателей натурных объектов при их эксплуатации. Это значительно снижает трудозатраты и затраты времени на разработку новых объектов, определение их рабочих характеристик и технико-экономическое обоснование новых технических решений и вариантов модернизации. Многовариантные расчеты на основе компьютерных 3D-моделей,



a



b

Рисунок 3 — Расчетная схема системы смазки дизельного двигателя: a — 3D-CAD-модель; b — расчетная сетка 12-цилиндрового V-образного двигателя

Figure 3 — Computation scheme of the diesel engine lubrication system: a — 3D CAD model; b — computational grid of a 12-cylinder V-shaped engine

а порой и линейных 1D-моделей ЦД позволяют отслеживать отклонения и обновлять базовую модель новыми данными после того, как отклонение превысит определенный порог. Численное моделирование процессов гидрогазодинамики и тепло-

массопереноса производится в ПО Ansys Fluent и CFX, OpenFoam, «Логос», а прочность, вибрации, термические деформации конструкции — Ansys Mechanical, LS DYNA.

Рассмотрим процедуру использования цифровых технологий при проектно-технологических работах по разработке новых образцов турбокомпрессора (ТКР) дизельного двигателя. Работа начинается с выбора прототипа турбокомпрессора. ТКР демонтируется, снимаются все геометрические параметры. При этом частично используется информация из открытых источников — чертежей, рабочих характеристик. Компьютерная модель ТКР создается на основе 3D-сканирования базовой конструкции с использованием Geomagic Design X. Все детали ТКР по отдельности сканируются, создается облако точек, на основе которого строится твердотельная модель с внутренними объемами и производится сравнительный анализ построенной модели и облака точек. Далее создается виртуальная сборка ТКР. На основе виртуальной сборки и 3D-моделей деталей разрабатывается рабочая документация (рисунок 4).

Далее виртуальная сборка ТКР передается в ПО ANSYS для создания расчетного домена и сеток. Уравнения движения, неразрывности и энергии вкпе с заданными граничными условиями и теплофизическими свойствами материалов являются физико-математической моделью происходящих газодинамических и тепловых процессов. Сопоставление результатов расчетов и экспериментальных данных или результатов натурных испытаний позволяет верифицировать и валидировать физико-математическую модель, сделав ее достоверной. Затем проводятся расчеты газодинамических и тепловых характеристик в компрессорной и турбинной ступенях турбокомпрессора. Результатом является обнаружение критических



Рисунок 4 — Алгоритм создания цифровой тени конструкции ТКР на основе оцифровки геометрии основных элементов и виртуальной сборки

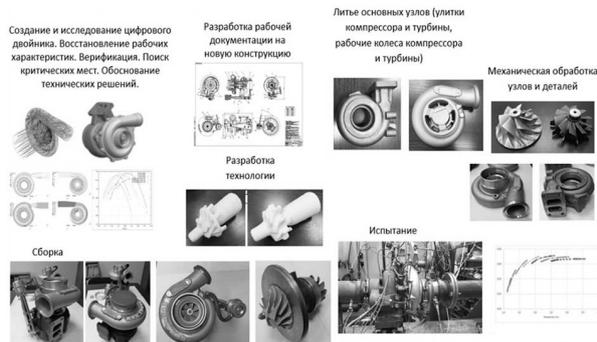
Figure 4 — Algorithm for creating a digital shadow of a turbocharger (TC) design based on digitization of the geometry of the main elements and a virtual assembly



**Рисунок 5** — Схема реализации проекта по разработке компьютерной модели или ЦД изделия-аналога ТКР дизельного двигателя и создания на его основе нового изделия с улучшенными характеристиками  
**Figure 5** — Project scheme for the development of a computer model or a digital twin of a product analog of the diesel engine TC and the creation of a new product with improved characteristics based on it

мест — отрывов потока, режимов помпажа, перетечек, термодформаций. Упомянутые явления ликвидируются введением новых технических решений. Таким образом создается компьютерная модель аналога ТКР.

После разработки цифрового двойника базовой модели ТКР в конструкцию вносятся изменения с целью повышения эффективности работы — проводятся изменение количества рабочих лопаток, их геометрии и геометрии проточной части (рисунок 5), а также виртуальные испытания новых технических решений по улучшению характеристик. На основе «горячей» компьютерной модели возможно проведение анализа напряженно-деформированного состояния подшипникового узла, что позволяет выявить термические деформации, которые могут приводить к значительным изменениям зазоров в подшипниках турбокомпрессора и вибрациям. Таким образом, происходит переход от решения сопряженной задачи «газодинамика–теплообмен» к более комплексной задаче «газодинамика–теплообмен–прочность».



**Рисунок 6** — Использование результатов численных исследований на базе цифрового двойника при создании конструкции и технологии производства нового изделия и его последующие испытания  
**Figure 6** — Use of numerical research results based on a digital twin in the creation of a design and production technology of a new product and its subsequent tests

После виртуальной проверки всех технических решений на измененной компьютерной модели создается новая конструкторская документация, технология производства новых деталей и узлов модернизированного ТКР, который изготавливается для дальнейших натурных испытаний и подтверждения правильно выбранной конструкции (рисунок 6).

**Заключение.** Показаны основы построения, преимущества и возможности использования цифровых технологий при конструкторско-технологических работах по созданию образцов новой техники. Основные результаты реализации проектов в сфере создания компьютерных моделей и ЦД и использования цифровых технологий в целом заключаются:

- в развитии цифрового проектирования — кастомизация методов, подходов и программного обеспечения; разработка новых технологий и компьютерный инжиниринг;
- создании базы для виртуальных испытаний — визуализация быстротекающих процессов; прогнозирование рабочих характеристик; оптимизация конструкций; масштабирование технических решений; оценка жизненного цикла изделия.

Цифровые технологии являются научной основой для принятия оптимальных технических решений. Преимущества их использования заключаются в снижении стоимости разработок, сокращении времени создания новых образцов техники, сокращении финансовых затрат на натурные испытания, повышении эффективности документооборота и создании конструкторской документации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и в рамках Соглашения о консорциуме между КНИТУ-КАИ и Институтом тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.*

## Список литературы

- Grieves, M.W. Digital twins: past, present, and future / M.W. Grieves // *The Digital Twin* / eds.: N. Crespi, A.T. Drobot, R. Minerva. — Springer, 2023. — P. 97–121. — DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4).
- Grieves, M. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems / M. Grieves, J. Vickers // *Transdisciplinary perspectives and complex systems: New findings and approaches* / eds.: F.-J. Kahlen, Sh. Flumerfelt, A. Alves. — Springer, 2017. — P. 85–113. — DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4).
- Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: краткий доклад / А.И. Боровков, А.А. Гамзикова, К.В. Кукушкин, Ю.А. Рябов. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. — 62 с.
- Поддубко, С.Н. Цифровое производство: основы и тенденции формирования. Информационно-аналитический обзор / С.Н. Поддубко, А.В. Шмелев // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2016. — № 4(37). — С. 66–74.
- Дозорцев, В.М. Цифровые двойники в промышленности: жизнь после хайпа / В.М. Дозорцев // *Автоматизация в промышленности*. — 2023. — № 12. — С. 7–13. — DOI: <https://doi.org/10.25728/avtprom.2023.12.01>.
- Проخورов, А. Цифровой двойник: анализ, тренды, мировой опыт / А. Проخورов, М. Лысачев; под ред. А. Боровкова. — М.: АльянсПринт, 2020. — 401 с.
- Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: ГОСТ Р 57700.37-2021. — Введ. 01.01.2022. — М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. — 15 с.
- Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения: ГОСТ Р 57700.21-2020. — Введ. 01.06.2021. — М.: Рос. ин-т стандартизации, 2020. — 8 с.
- Цифровые двойники – основа принятия оптимальных технических решений и повышения финансовой эффективности разработок / В.М. Гуреев, Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов [и др.] // *Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2023: сб. тр. конф.* / Науч. центр безопасности жизнедеятельности детей. — Казань, 2023. — Ч. 1. — С. 313–323.
- Опыт создания цифровых двойников для моделирования эксплуатационных режимов транспортных систем / А.Д. Чорный, Ю.В. Жукова, Т.А. Баранова [и др.] // *Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2023: сб. тр. конф.* / Науч. центр безопасности жизнедеятельности детей. — Казань, 2023. — Ч. 1. — С. 442–450.
- Цифровые двойники – идеология, опыт и перспективы / И.А. Попов, В.М. Гуреев, Е.Г. Макаров [и др.] // *Вестник НЦБЖД*. — 2024. — № 3(61). — С. 80–87.
- Обозов, А.А. Гидродинамический анализ процессов топливных систем типа «COMMON RAIL» в среде имитационного моделирования AVL BOOST HYDSIM / А.А. Обозов, Р.А. Новиков, П.А. Гришанов // *Транспортное машиностроение*. — 2022. — № 9(9). — С. 4–10. — DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-9-4-10>.
- AVL Boost: a powerful tool for research and education / G. Bellér, I. Árpád, J.T. Kiss, D. Kocsis // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — Vol. 1935. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012015>.
- Исследование параметров системы смазки двигателя грузового автомобиля при различных рабочих температурах моторного масла / Р.Р. Салахов, А.М. Ермаков, Р.М. Хисматуллин [и др.] // *Грузовик*. — 2022. — № 4. — С. 3–9.
- Численное моделирование системы смазки авиационных поршневых двигателей / И.А. Попов, М.В. Гуреев, В.М. Гуреев [и др.] // *Изв. Высших учебных заведений. Авиационная техника*. — 2024. — № 1. — С. 94–100.
- Определение потерь давления в главной масляной магистрали и форсунках системы смазки дизельных двигателей большегрузных автомобилей: численное моделирование / А.Д. Чорный, И.А. Попов, Ю.В. Жукова [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2024. — № 3(68). — С. 28–35. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-28-35>.
- Численное моделирование гидродинамических процессов в героторном насосе системы смазки дизельных двигателей / И.А. Попов, Ю.В. Жукова, А.Д. Чорный [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2024. — № 4(69). — С. 28–38. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-28-38>.
- Гидродинамика и теплообмен в каналах сложной формы двигательных установок транспортных систем / И.А. Попов, В.М. Гуреев, М.В. Гуреев [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. — 2024. — Т. 97, № 7. — С. 1838–1852.
- Гидродинамические и тепловые процессы в охладителе масла системы смазки дизельных двигателей: численное моделирование / И.А. Попов, Ю.В. Жукова, А.Д. Чорный [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2025. — № 3(72). — С. 5–17. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-5-17>.

**POPOV Igor A.**, Corresponding Member of TAS, D. Sc. in Eng.

Professor of the Department for Heat and Power Engineering, Head of the Laboratory of Modeling Physical and Technical Processes<sup>1</sup>

E-mail: [popov-igor-alex@yandex.ru](mailto:popov-igor-alex@yandex.ru)

**GUREEV Victor M.**, D. Sc. in Eng.

Leading Researcher of the Laboratory of Modeling Physical and Technical Processes<sup>1</sup>

E-mail: [victor.gureev@kai.ru](mailto:victor.gureev@kai.ru)

**ZHUKOVA Yuliya V.**, Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Leading Researcher of Turbulence Laboratory<sup>2</sup>

E-mail: [julia\\_zhukova@rambler.ru](mailto:julia_zhukova@rambler.ru)

**CHORNY Andrei D.**, Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Head of Turbulence Laboratory<sup>2</sup>

E-mail: [anchor@hmti.ac.by](mailto:anchor@hmti.ac.by)

**BARANOVA Tatsiana A.**

Senior Researcher of Turbulence Laboratory<sup>2</sup>

E-mail: [bartat@tut.by](mailto:bartat@tut.by)

**KUKHARCHUK Igor G.**

Researcher of Turbulence Laboratory<sup>2</sup>

E-mail: [doomer1979@mail.ru](mailto:doomer1979@mail.ru)

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

<sup>2</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## DIGITAL TECHNOLOGIES APPLICATION IN DIESEL ENGINE DESIGN: FROM CONCEPT TO SERIAL PRODUCTION

The paper presents the key aspects of using digital technologies in mechanical engineering covering the stages of design and technological preparation of production. The methodology for creating 3D CAD models, forming design and technological documentation, creating virtual assemblies and digital twins using 1D and 3D modeling are described. Examples of numerical tests and practical implementation of developments are given on the example of diesel engine components and assemblies for transport systems.

**Keywords:** digital technologies, decomposition, digital twins, heat and mass transfer, numerical simulation, verified and validated physical and mathematical model, aerodynamics, strength

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-15-22>

### References

- Grieves M.W. Digital twins: past, present, and future. *The digital twin*, 2023, pp. 97–121. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4).
- Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives and complex systems: New findings and approaches*, 2017, pp. 85–113. DOI: [https://doi.org/10.1007/9783-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/9783-319-38756-7_4).
- Borovkov A.I., Gamzikova A.A., Kukushkin K.V., Ryabov Yu.A. *Tsifrovye dvoyniki v vysokotekhnologichnoy promyshlennosti. Kratkiy doklad* [Digital twins in the high-tech industry. Brief report]. Saint Petersburg, POLITEKH-PRESS Publ., 2019. 62 p. DOI: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/i20-130> (in Russ.).
- Poddubko S.N., Shmelyev A.V. Tsifrovoye proizvodstvo: osnovy i tendentsii formirovaniya. Informatsionno-analiticheskiy obzor [Digital production: fundamentals and trends development. Informational-analytical review]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2016, no. 4(37), pp. 66–74 (in Russ.).
- Dozortsev V.M. Tsifrovye dvoyniki v promyshlennosti: zhizn posle khaypa [Digital twins in industry: life after hype]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2023, no. 12, pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.25728/avtprom.2023.12.01> (in Russ.).
- Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik: analiz, trendy, mirovoy opyt* [Digital twin. Analysis, trends, world experience]. Moscow, AlyansPrint Publ., 2020. 401 p. (in Russ.).
- State Standard R 57700.37–2021. *Kompyuternye modeli i modelirovaniye. Tsifrovye dvoyniki izdeliy. Obshchie polozheniya* [Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2021. 15 p. (in Russ.).
- State Standard R 57700.21–2020. *Kompyuternoye modelirovaniye v protsessakh razrabotki, proizvodstva i obespecheniya ekspluatatsii izdeliy. Terminy i opredeleniya* [Computer modelling in the processes of development, manufacturing and maintenance of products. Terms and definitions]. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2020. 8 p. (in Russ.).
- Gureev V.M., Gortyshev Yu.F., Popov I.A., Makarov E.G., Kulikov A.S. Tsifrovye dvoyniki – osnova prinyatiya optimalnykh tekhnicheskikh resheniy i povysheniya finansovoy effektivnosti razrabotok [Digital twins as the basis for optimal technical solutions and increased financial efficiency of developments]. *Mezhdunarodnyy forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2023* [International forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2023], Kazan, 2023, part 1, pp. 313–323 (in Russ.).
- Chorny A.D., Zhukova Yu.V., Baranova T.A., Kukharchuk I.G., Popov I.A. Opyt sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov dlya modelirovaniya ekspluatatsionnykh rezhimov transportnykh sistem [Experience in creating digital twins for modeling operational modes of transport systems]. *Mezhdunarodnyy forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2023* [International forum KAZAN DIGITAL WEEK – 2023], Kazan, 2023, part 1, pp. 442–450 (in Russ.).
- Popov I.A., Gureev V.M., Makarov E.G., Kulikov A.S., Andriyanov S.M. Tsifrovye dvoyniki – ideologiya, opyt i perspektivy [Digital twins – ideology, experience and prospects]. *Vestnik NTsBZhD*, 2024, no. 3(61), pp. 80–87 (in Russ.).
- Obozov A.A., Novikov R.A., Grishanov P.A. Gidrodinamicheskiy analiz protsessov toplivnykh sistem tipa “COMMON RAIL” v srede imitatsionnogo modelirovaniya AVL BOOST HYDSIM [Hydrodynamic analysis of processes of COMMON RAIL fuel systems in AVL BOOST HYDSIM simulation environment]. *Transport engineering*, 2022, no. 9(9), pp. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-9-4-10> (in Russ.).
- Bellér G., Árpád I., Kiss J.T., Kocsis D. AVL Boost: a powerful tool for research and education. *Journal of physics: conference series*, 2021, vol. 1935. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012015>.
- Salakhov R.R., Ermakov A.M., Khismatullin R.M., Smolyakov Yu.A., Razvalyaev S.V. Issledovanie parametrov sistemy smazki dvigatelya gruzovogo avtomobilya pri razlichnykh rabochikh temperaturakh motornogo masla [Investigation of the parameters of the lubrication system of a truck engine at various operating oil temperatures]. *Truck*, 2022, no. 4, pp. 3–9 (in Russ.).
- Popov, I.A., Gureev M.V., Gureev V.M., Zhukova Yu.V., Chorny A.D. Chislennoye modelirovaniye sistemy smazki aviatsionnykh porshnevnykh dvigateley [Numerical simulation of the lubrication system of aircraft piston engines]. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Aviatsonnaya tekhnika*, 2024, no. 1, pp. 94–100 (in Russ.).
- Chorny A.D., et al. Opredeleniye poter davleniya v glavnoy maslyanoy magistrali i forsunkakh sistemy smazki dizelnykh dvigateley bolshegruznykh avtomobilye: chislennoye modelirovaniye [Determining the pressure losses in the main oil line and injectors of the lubrication system of diesel engines of heavy vehicles: numerical simulation]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 3(68), pp. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-28-35> (in Russ.).
- Popov I.A., et al. Chislennoye modelirovaniye gerotornogo nasosa sistemy smazki dizelnykh dvigateley [Numerical modeling of hydrodynamic processes in the gerotor pump of the lubrication system of diesel engines]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2024, no. 4(69), pp. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-28-38> (in Russ.).
- Popov I.A., et al. Gidrodinamika i teploobmen v kanalakh slozhnoy formy dvigatelnykh ustanovok transportnykh sistem [Hydrodynamics and heat transfer in intricately shaped channels of power units of transportation systems]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2024, vol. 97, iss. 7, pp. 1838–1852 (in Russ.).
- Popov I.A., et al. Gidrodinamicheskie i teplovye protsessy v okhladitele masla sistemy smazki dizelnykh dvigateley: chislennoye modelirovaniye [Hydrodynamic and thermal processes in the oil cooler of the lubrication system of diesel engines: numerical simulation]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2025, no. 3(72), pp. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-5-17> (in Russ.).