

В. В. Ключай
В. Е. Селезнев
С. Н. Шушурин

Цифровые двойники в металлургии и машиностроении

Технологии
создания и
реализации
на производстве

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \alpha_m \cdot \rho_m \cdot dV + \iint_S \alpha_m \cdot \rho_m \cdot \vec{v}_m \cdot dS =$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \alpha_m \cdot \rho_m \cdot \vec{v}_m \cdot dV +$$

$$= - \iiint_V \alpha_m \cdot \vec{\nabla} p \cdot dV$$

$$+ \iiint_V \alpha_m \cdot \rho_m \cdot \vec{F}_m \cdot dV$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \alpha_m \cdot \rho_m \cdot \left(\varepsilon_m + \frac{v_m^2}{2} \right) dV =$$

$$= \iint_S q_m \cdot (\vec{\tau}_m + \vec{\tau}_m^T) \cdot \vec{n} \cdot dS$$

$$+ \iiint_V \alpha_m \cdot \rho_m \cdot \vec{F}_m \cdot \vec{v}_m \cdot dV$$

$$+ \iiint_V J_m^{src, E} \cdot dV + \iiint_V Q_m \cdot dV$$

$$\vec{M}_1^{мехфазный} = - \sum_{m=1}^N \vec{M}_m^{мехфазный}$$



$$\iiint_V J_m^{src, \rho} \cdot dV, m = \overline{1, N};$$

$$dS =$$

$$+$$

$$\iiint_V \vec{M}_m^{мехфазный} \cdot dV, m = \overline{1, N};$$

$$\left(v_m + \frac{v_m^2}{2} \right) (v_m)_n \cdot dS =$$

$$\iint_S \alpha_m \cdot (k_m + k_m^T) \cdot \frac{\partial T_m}{\partial n} \cdot dS +$$

$$(\vec{v}_m - \vec{v}_1) \cdot \vec{n}$$

В. В. Ключай, В. Е. Селезнев, С. Н. Шушурин

Цифровые двойники в металлургии и машиностроении

**Технологии создания и реализации
на производстве**

Монография



МОСКВА – 2025

УДК 004.02 004.8 004.94 621.22 669.2
ББК 34.39 34.41 34.42 34.47 34.53 34.7



<https://elibrary.ru/dpxxyd>

Рецензенты:

- А. В. Ильин* – член-корреспондент РАН, профессор, д.ф.-м.н., МГУ имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, кафедра нелинейных динамических систем и процессов управления;
С. И. Мухин – профессор, д.ф.-м.н., МГУ имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, кафедра вычислительных методов

Ключай, Виктор Владимирович.

K50 Цифровые двойники в металлургии и машиностроении: технологии создания и реализации на производстве : монография / В. В. Ключай, В. Е. Селезнев, С. Н. Шушурин. – Москва : МАКС Пресс, 2025. – 416 с. ISBN 978-5-317-07436-4
<https://doi.org/10.29003/m4727.978-5-317-07436-4>

В монографии представлены научно-прикладные основы специальной металлургии и тяжёлого машиностроения, предусматривающие создание и промышленное применение цифровых двойников в составе виртуальных испытательных стендов (ВИС) наукоёмких технологических процессов, реализуемых на уникальном промышленном оборудовании. Привлечение указанных двойников и стендов направлено на эффективное решение производственных задач с повышенным барьером сложности, научное обоснование и оптимальное приложение получаемых результатов.

Ключевыми инструментами решения таких задач являются построение с использованием существующей методологии разработки и применения технологий ВИС, а также практическая реализация комплекса автоматизированных сопряжённых методов синтеза, анализа и оптимизации наукоёмких продуктов в виде указанных выше технологических процессов и промышленного оборудования. Поиск решения проводится на базе ВИС посредством рекурсивного задействования численного аналитико-имитационного моделирования повышенной точности и численной оптимизации облика и/или поведения цифровых двойников в специально созданной компьютерной среде научно обоснованной виртуальной реальности.

Материал, содержащийся в книге, нашёл своё производственное воплощение при разработке, изготовлении, испытаниях и эксплуатации промышленных газостатов для горячего изостатического прессования, а также при совершенствовании технологических процессов промышленной газовой атомизации в ходе вакуумного индукционного газового распыления расплава металла потоками инертного газа в камере с охлаждаемыми стенками.

Монография ориентирована на научных и инженерно-технических специалистов, занимающихся синтезом, анализом или оптимизацией проектных, конструкторских и технологических решений по разработке, выпуску и эксплуатации наукоёмкой продукции металлургии и машиностроения. Представленный в ней материал может оказаться полезным аспирантам и преподавателям, работающим в области высокоточного компьютерного моделирования для данных отраслей промышленности.

Книга доступна студентам старших курсов технических вузов.

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения её владельца.

555005

ISBN 978-5-317-07395-4



© В. В. Ключай, В. Е. Селезнев, С. Н. Шушурин, 2025
© М. В. Селезнева (дизайн обложки), 2025
© Оформление. ООО «МАКС Пресс», 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	8
СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛЪЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	18

ГЛАВА 1

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ТЯЖЁЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ

1.1. Ключевые аспекты создания технологий ВИС для синтеза, анализа и оптимизации наукоёмких технологических процессов и промышленного оборудования для их реализации	25
1.2. Универсальный алгоритм решения исходной производственной проблемы в специальной металлургии или тяжёлом машиностроении с применением технологий ВИС	42
1.2.1. Концепция реализации Шага 1 «Вербальное описание постановки обобщённой задачи построения и эксплуатации ВИС для устранения исходной производственной проблемы»	42
1.2.2. Концепция реализации Шага 2 «Формирование концептуальных моделей для решения исходной производственной проблемы»	46
1.2.3. Концепция реализации Шага 3 «Построение математических моделей для преодоления исходной производственной проблемы» ...	49
1.2.4. Концепция реализации Шага 4 «Компьютерная реализация разработанных математических моделей и методов их численного исследования для решения исходной производственной проблемы»	67
1.2.5. Концепция реализации Шага 5 «Разработка ВИС для устранения исходной производственной проблемы»	69
1.2.6. Концепция реализации Шага 6 «Тестирование, верификация и валидация ВИС»	71
1.2.7. Концепция реализации Шага 7 «Научное планирование виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы»	74
1.2.8. Концепция реализации Шага 8 «Решение исходной производственной проблемы посредством проведения виртуальных экспериментов на базе ВИС»	78

1.2.9. Концепция реализации Шага 9 «Внедрение полученных результатов эксплуатации ВИС для устранения исходной производственной проблемы»	82
1.3. Завершающие акценты в изложении универсального алгоритма	82

ГЛАВА 2

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГАЗОСТАТА СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

2.1. Вербальное описание постановки обобщённой задачи построения и эксплуатации ВИС физических процессов управляемого функционирования газостата	87
2.2. Формирование концептуальных моделей для решения исходной производственной проблемы	97
2.3. Построение математических моделей для преодоления исходной производственной проблемы	99
2.3.1. Практический метод моделирования нестационарных физических процессов управляемого функционирования ленточных молибденовых нагревателей с учётом их трёхфазного или однофазного электропитания при осуществлении технологических операций нагрева и изотермической выдержки	111
2.3.2. Практический метод синтеза алгоритмов оптимального управления безаварийными режимами технологического нагрева содержимого рабочей зоны контейнера газостата и оптимизации её конструктивного исполнения	159
2.3.3. О построении моделирующего алгоритма	172
2.4. Компьютерная реализация разработанных математических моделей и методов их численного исследования для решения исходной производственной проблемы	174
2.5. Разработка ВИС для устранения исходной производственной проблемы	188
2.6. Тестирование, верификация и валидация ВИС	188
2.7. Научное планирование виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы	200
2.8. Решение исходной производственной проблемы посредством проведения виртуальных экспериментов на базе ВИС	200
2.9. Внедрение полученных результатов эксплуатации ВИС для устранения исходной производственной проблемы	202

ГЛАВА 3

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ
ВИРТУАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И МЕХАНИЗМОВ
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЮ САТЕЛЛИТОВ И АГЛОМЕРАЦИЙ
ПРИ ГАЗОВОЙ АТОМИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

3.1. Вербальное описание постановки обобщённой задачи построения и эксплуатации ВИС физических процессов образования и механизмов противодействия возникновению спутников и агломераций	238
3.2. Формирование концептуальных моделей для решения исходной производственной проблемы	255
3.3. Построение математических моделей для преодоления исходной производственной проблемы	256
3.3.1. Основные имитационные математические модели, применяемые для решения поставленной задачи	256
3.3.1.1. Модель нестационарного неизотермического движения многокомпонентной газовой смеси	258
3.3.1.2. Адаптация модели движения многокомпонентной газовой смеси к описанию динамики металлогазового факела	261
3.3.1.3. Неустраняемые погрешности моделирования металлогазового факела в приближении движения многокомпонентной газовой смеси, содержащей металлический туман	273
3.3.1.4. Многофазная модель течения металлогазового факела в приближении движения частиц в потоке сплошной среды	274
3.3.2. Практический метод синтеза, анализа и оптимизации технологических и конструкторских решений для предотвращения возникновения паразитных спутников и агломераций при газовой атомизации металлических расплавов	287
3.3.2.1. Технология высокоточного компьютерного моделирования физических процессов функционирования металлогазового факела на промышленной установке в классическом газовом приближении (ТВКМ-1)	288
3.3.2.2. Технология высокоточного компьютерного моделирования физических процессов функционирования металлогазового факела на промышленной установке в приближении металлического тумана (ТВКМ-2)	298

3.3.2.3. Технология высокоточного компьютерного моделирования физических процессов функционирования металлогазового факела на промышленной установке в многофазном приближении (ТВКМ-3)	305
3.3.2.4. Квинтэссенция подхода к проведению критического сравнительного анализа результатов практического применения ТВКМ-1, ТВКМ-2 и ТВКМ-3	308
3.3.2.5. Автоматизированный поиск оптимальных конструкторских или технологических решений по предотвращению возникновения паразитных сателлитов и агломераций при газовой атомизации металлических расплавов (ТВКМ-4)	311
3.3.3. О построении моделирующего алгоритма	315
3.4. Компьютерная реализация разработанных математических моделей и методов их численного исследования для решения исходной производственной проблемы	316
3.5. Разработка ВИС для устранения исходной производственной проблемы	319
3.6. Тестирование, верификация и валидация ВИС	319
3.7. Научное планирование виртуальных экспериментов на базе ВИС для решения исходной производственной проблемы	322
3.8. Решение исходной производственной проблемы посредством проведения виртуальных экспериментов на базе ВИС	322
3.9. Внедрение полученных результатов эксплуатации ВИС для устранения исходной производственной проблемы	323
3.10. Практический пример численного оценивания эффективности функционирования кольцевого сопла Лавалья в составе формирователя распылительной струи	328
3.11. Практический пример численного оценивания эффективности увеличения диаметра трубы для отвода кристаллизованного металлического порошка до 200 мм	355

ГЛАВА 4

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ В МЕТАЛЛУРГИЮ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

4.1. Обобщение описанных производственных результатов реализации технологий ВИС на предприятиях специальной металлургии и тяжёлого машиностроения	362
---	-----

4.2. Ключевые факторы, инициировавшие внедрение технологий ВИС на предприятиях специальной металлургии и тяжёлого машиностроения	366
4.2.1. Интенсивное развитие традиционных методов численного моделирования для решения задач машиностроительного производства и металлургии	366
4.2.2. Многолетний опыт успешного применения на производстве расширенной концепции численного моделирования технологических систем	369
4.2.3. Современный уровень развития методологии автоматизированного проектирования технических изделий и технологических процессов	372
4.2.4. Существующий положительный опыт разработки и применения цифровых двойников в металлургии	377
4.2.5. Накопленный опыт разработки и применения цифровых двойников в машиностроении	378
4.2.6. Сложившиеся тенденции в развитии современных промышленных предприятий, способствующие развитию и внедрению цифровых двойников	381
4.3. Преимущества и риски применения технологий ВИС в производственной практике	382
4.4. Об оценке экономической эффективности внедрения технологий ВИС	391
4.5. Краткая информация об оценках состояния и прогнозах развития мировых рынков технологий цифровых двойников	396
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	399
СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПУБЛИКАЦИЙ	401

Введение

Цель расчётов – не числа, а понимание.

Р. Хемминг

В условиях внешнеполитической нестабильности одной из важнейших задач предприятий специальной металлургии и тяжёлого машиностроения становится импортозамещение зарубежной наукоёмкой продукции перечисленных отраслей промышленности. Её решение требует создания в предельно сжатые сроки прорывных технологических процессов и передового технологического оборудования отечественной разработки и российского производства.

К наукоёмкой продукции можно отнести сложную техническую или технологическую систему, обладающую уникальными характеристиками свойств и/или уникальными функциональными возможностями, которые реализуют современные достижения прикладных наук, высоких технологий и компьютерной техники [1]. В рамках настоящей монографии под *наукоёмким продуктом*¹ (НП) будет подразумеваться:

- а) либо наукоёмкий технологический процесс (ТП) специальной металлургии или тяжёлого машиностроения;
- б) либо наукоёмкое промышленное оборудование для реализации указанного ТП;
- в) либо сочетание вышеперечисленных процессов и оборудования.

С учётом существующего технологического уклада на текущем этапе развития общества [2, 3] в условиях острого дефицита временных, материальных, финансовых и кадровых ресурсов достичь практически значимых результатов решения поставленной государственной задачи невозможно без значительного расширения и углубления теоретико-прикладных и алгоритмических основ специальной металлургии и тяжёлого машиностроения. Одним из перспективных путей ускоренного формирования новых и развития существующих основ является разработка, реализация и производственное применение компьютерных сред научно обоснованной виртуальной реальности (СНОВР), позволяющих осуществлять глубоко автоматизированные процедуры синтеза, анализа и оптимизации проектных, конструкторских, технологических или эксплуатационных решений по созданию, изготовлению, экспериментальной отработке и использованию управляемых динамических НП на базе гибридного привлечения:

- методов численного аналитико-имитационного моделирования повышенной точности [1, 4–12];
- технологий виртуальных испытательных стендов (ВИС) [1, 63];
- технологий цифровых двойников (ЦД) [1, 13, 61–63];
- элементов искусственного интеллекта (ИИ) [14–17];
- теории автоматического управления (ТАУ) [18–22];

¹ В узком смысле определения.

– методов условной структурно-параметрической оптимизации (УСПО) [14, 17, 23–28]

с требованиями их адаптации и привязки к исследуемому НП и виртуальным процедурам над совокупностью построенных ЦД НП и СНОВР, проводимым в составе специально созданного ВИС.

В связи с вышеизложенным настоящая монография посвящена построению, научному обоснованию и детальному описанию ключевых аспектов производственной эксплуатации комплекса практических методов и алгоритмов глубоко автоматизированного решения производственных задач разработки и совершенствования наукоёмких технологических процессов:

- 1) управляемого функционирования промышленного газостата сверхвысокого давления при выполнении горячего изостатического прессования (ГИП);
- 2) изготовления металлических порошков посредством вакуумного индукционного газового распыления расплава металла потоками инертного газа в камере с охлаждаемыми стенками (далее по тексту – газовая атомизация).

Создаваемые методы и варианты их компьютерной реализации помимо совершенствования ТП следует ориентировать на выполнение УСПО элементов конструкции технологического оборудования в виде промышленных газостатов и промышленных установок газовой атомизации, их параметров и режимов функционирования.

Установленное в данной книге ограничение на перечень исследуемого промышленного оборудования позволило предотвратить перегрузку её содержания избыточными деталями, усложняющими восприятие материала. При этом отсутствие таких деталей не оказывает негативного влияния на возможность переноса и распространения излагаемого материала на разработку, реверсный инжиниринг, модернизацию или эксплуатацию достаточно широкого спектра сложных ТП и наукоёмкого технологического оборудования в разных областях металлургии и машиностроения.

В процессе написания настоящей монографии авторы руководствовались базовыми положениями методологии разработки и применения технологий ВИС, изложенными в работе [1]. Эти положения содержат структурированную информацию о научно-прикладных подходах, методах, способах и средствах поиска оптимального решения, а также обоснования получаемых практически значимых результатов для устранения исходных производственных проблем (ИПП) с повышенным барьером сложности, возникающих на этапах жизненных циклов (ЖЦ) широкого спектра наукоёмкой технической или технологической продукции. Далее по тексту книги методология разработки и применения технологий ВИС будет сокращённо называться *методологией ТехноВИС*.

Обращение к данной методологии прежде всего объясняется тем, что в её составе содержится совокупность верифицированных практически значимых алгоритмов устранения сложных производственных проблем разной природы и различной направленности с задействованием технологий ВИС, которые подтвердили свою работоспособность и эффективность более чем тридцатилетним успешным применением во многих ключевых отраслях промышленности (см.,

например, [1, 7–10, 29–37]). Не менее важным аргументом в пользу её выбора в качестве отправной точки для написания книги послужило то, что изучение методологии ТехноВИС, при всей подробности и обоснованности её изложения, не требует от читателя углублённой подготовки в областях математической физики, вычислительной математики и математической оптимизации. Это обстоятельство имеет положительное значение для проектировщиков, конструкторов, технологов и эксплуатационников.

Согласно методологии ТехноВИС, решение ИПП осуществляется на базе ВИС с помощью гибридного использования алгоритмов УСПО с элементами ИИ и совокупности цифровых двойников разных типов, функционирующих в единой компьютерной среде научно обоснованной виртуальной реальности. При этом процессы существования и управляемого динамического поведения НП (или его компонентов) описываются средствами численного аналитико-имитационного моделирования повышенной точности с учётом его взаимодействия с возмущённой внешней средой в условиях воздействий ожидаемых естественных помех, возможных ошибок управления и прогнозируемых негативных факторов.

Применительно к тематике настоящей монографии термин «цифровой двойник» ассоциируется с детальным компьютерным моделированием динамики исследуемого ТП или типа¹ промышленного оборудования с максимально достижимыми на практике достоверностью, точностью и адекватностью в условиях априори заданных сроков решения ИПП и фактической доступности вычислительных мощностей. Такое моделирование проводится в рамках ограничений, заданных при постановке решаемой производственной задачи с использованием собранных, обработанных и интерпретированных исходных данных² (ИД). Отсюда, виртуальное поведение ЦД должно стремиться к достижению максимального уровня идентичности с динамическим поведением моделируемой натурной системы как в качественном, так и в количественном аспектах.

В общем случае основными средствами (инструментами) устранения возникшей производственной проблемы в методологии ТехноВИС являются построение и эксплуатация виртуального испытательного стенда, выполненного в виде прикладной компьютерной программы или малой компактной киберфизической системы (КФС) [1, 38, 39]. Здесь следует особо отметить, что в данной книге построение ВИС будет ограничено исключительно форматом специализированной компьютерной программы.

Решение поставленной производственной задачи на базе ВИС осуществляется посредством разработки, компьютерной реализации и практического применения глубоко автоматизированных численных процедур синтеза, анализа и оптимизации НП в ходе специально запланированных виртуальных экспериментов в рамках заданных ограничений под автоматизированным управлением предварительно обученных операторов из числа высококвалифицированных разработчиков НП или ВИС.

¹ Или образца.

² Включая данные как натуральных, так и виртуальных экспериментов.

Под *виртуальным экспериментом (испытанием)* здесь подразумевается выполнение для исследуемого НП (или его компонентов) численных процедур синтеза, анализа, оптимизации и/или прогнозирования его [1]:

- 1) конструктивного и/или технологического исполнения, включая состав, геометрию и топологию;
- 2) количественных параметров, инспектируемых на их фактическое соответствие априори заданным тактико-техническим требованиям (ТТТ), техническим требованиям и иным требованиям технического задания (ТЗ);
- 3) количественных и качественных характеристик исследуемых свойств;
- 4) количественных и качественных показателей ожидаемых или изучаемых функциональных возможностей;
- 5) адаптивных робастных алгоритмов оптимального управления режимами функционирования;
- 6) стратегий управляемого поведения в условиях штатной эксплуатации, а также в ожидаемых переходных, нештатных, критических и аварийных ситуациях

с учётом воздействий на НП (или его компоненты) совокупности факторов эксперимента в условиях:

- а) направленного или ситуационного изменения режима функционирования объекта моделирования и/или контура его системы управления в рамках установленных границ допускаемых вариаций таких изменений;
- б) динамического взаимодействия объекта моделирования и/или контура его системы управления с возмущённой внешней средой;
- в) ожидаемых естественных помех;
- г) возможных ошибок управления;
- д) прогнозируемых негативных факторов.

Таким образом, можно констатировать, что *виртуальный испытательный стенд* в первую очередь предназначен для углублённого численного исследования с повышенной точностью и численной оптимизации параметров и характеристик свойств процессов существования и управляемого поведения НП (или его компонентов) на этапах его жизненного цикла с учётом многообразия такого поведения, а также направленного изменения состава, геометрии и топологии объекта моделирования (по необходимости).

Под *технологией ВИС* в этой монографии подразумевается алгоритмизированная совокупность способов и приёмов получения научно обоснованного и практически значимого решения заданного класса ИПП с повышенным или высоким барьером сложности, связанных с проектированием, конструированием, реинжинирингом, модернизацией, экспериментальной отработкой, эксплуатацией и/или углублённым изучением НП (см. [1]). Поиск указанного решения осуществляется в процессе научного планирования и проведения на базе ВИС серий виртуальных экспериментов, направленных на устранение возникшей производственной проблемы.

В основу создания совокупности способов и приёмов получения и научного обоснования практически значимого решения заданного класса ИПП было положено синергетическое сочетание [1]:

- 1) общей схемы вычислительного эксперимента на базе ВИС;
- 2) вложенных концепции и методологии построения и эксплуатации ВИС;
- 3) комплекса алгоритмов, основанных на известных методах:
 - а) теоретической механики;
 - б) механики сплошных сред (МСС);
 - в) равновесной термодинамики и сложного тепломассопереноса;
 - г) численного решения задач классической математической физики;
 - д) УСПО, включая ряд алгоритмов эволюционного и нейросетевого программирования;
 - е) теории автоматического управления;
 - ж) научного планирования экспериментов;
 - з) обработки и интерпретации результатов экспериментов и др.;
- 4) компьютерного аналитического инструментария (КАИ) Alfargus [64] для ускоренной разработки нового или модернизации существующего ВИС в целях устранения конкретной ИПП.

Промышленное воплощение указанной совокупности предусматривает постановку и численное решение под управлением цифрового менеджера¹ (ЦМ) ВИС комплекса практических задач однокритериальной и/или многокритериальной УСПО по поиску наилучшего для рассматриваемого НП сочетания его облика, состава, структуры, конструктивного и/или технологического исполнения, характеристик свойств, функциональности и управления в рамках заданных ограничений (см. [1]). Эти ограничения формализуют предъявляемые к объекту моделирования требования и выдвигаемые условия посредством замены его реального взаимодействия с окружающей действительностью на виртуальное функционирование ЦД разных типов в единой компьютерной СНОВР, с максимально достижимыми достоверностью и адекватностью имитирующее его существование и динамическое поведение в процессе натурных испытаний или эксплуатации в штатных, переходных, нештатных, критических и аварийных ситуациях на заданных этапах и стадиях его ЖЦ.

В рамках методологии ТехноВИС стремление к проведению глобальной оптимизации подкрепляется комплексным применением [1]:

- алгоритмов автоматизированной постановки и автоматической модификации обозначенных выше задач УСПО по отношению к объекту моделирования и контуру его системы управления;
- алгоритмов автоматического решения поставленных оптимизационных задач на базе сопряжённого и согласованного использования методов математиче-

¹ Это разновидность типа (вида) цифрового двойника [1, 13, 61–63].

ского, динамического, стохастического и эволюционного программирования, а также дискретной оптимизации (по необходимости).

Сочетание перечисленных выше алгоритмов в рамках настоящей монографии условно обозначается термином «Алгоритмы ГО».

При разработке комплекса практических методов и алгоритмов глубоко автоматизированного решения производственных задач синтеза, анализа и оптимизации ТП и промышленного оборудования в состав *обобщённых объектов исследования* (ОИ) будут входить:

а) 3D нестационарные физические процессы сложного тепломассопереноса, протекающие в контейнере исследуемого промышленного газостата сверхвысокого давления:

- при прокаливании электрических нагревателей в условиях технического вакуума, предварительно созданного в рабочей зоне контейнера газостата;
- при свободном напуске инертного газа в контейнер газостата после его вакуумирования с учётом присутствия в его конструкции теплоизоляционного микропористого материала;
- при технологическом нагреве содержимого рабочей зоны контейнера газостата со стенками, автоматически охлаждаемыми технической водой, при наличии в его конструкции газонаполненного микропористого теплоизолятора;
- при технологической изотермической выдержке габаритно-весовых имитаторов обрабатываемых деталей в рабочей зоне контейнера газостата с охлаждаемыми стенками при наличии в его конструкции указанного теплоизолятора;
- при технологическом охлаждении содержимого рабочей зоны контейнера газостата с охлаждаемыми стенками при наличии в его конструкции теплоизоляционного газонаполненного микропористого материала (в том числе по необходимости в условиях вынужденной конвекции, обеспечиваемой встроенным компрессором);
- при выпуске инертного газа из контейнера газостата после завершения горячего изостатического прессования габаритно-весовых имитаторов обрабатываемых деталей с учётом поведения газонаполненного теплоизолятора;
- при возможных аварийных ситуациях, связанных с разгерметизацией контейнера газостата и др.;

б) 3D нестационарные физические процессы управляемого функционирования ленточных молибденовых нагревателей в защитной атмосфере рабочей зоны контейнера газостата с учётом их трёхфазного или однофазного электропитания при осуществлении технологических режимов нагрева содержимого рабочей зоны и изотермической выдержки габаритно-весовых имитаторов обрабатываемых деталей;

в) 3D нестационарные физические процессы динамического поведения тепло-