

УДК 621.452.3:004.942

doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115

Верификация и валидация компьютерных моделей

А.В. Сальников¹, М.С. Французов¹, К.А. Виноградов²,
К.Р. Пятунин², А.С. Никулин³

¹ ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

² ПАО «ОДК-Сатурн»

³ АО «ОДК»

Digital Simulation Verification and Validation

A.V. Salnikov¹, M.S. Frantsuzov¹, K.A. Vinogradov²,
K.R. Pyatunin², A.S. Nikulin³

¹ P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development

² PJSC UEC-Saturn

³ JSC United Engine Corporation

Показан путь получения современных компьютерных моделей: от концептуальной математической модели до частных настроек компьютерной модели, например, выбора параметров дискретизации расчетных сеток. Описан обобщенный подход к верификации и валидации (ВВ) компьютерных моделей и его основные этапы. В основе предложенного подхода использовано предположение, что моделируемые сложные физические явления и объекты имеют иерархическую структуру, которая позволяет разложить их на составные части/элементы (по конструкции — узлы и детали или по дисциплинам — газовая динамика, горение, теплообмен и т. д.). Для каждого элемента использована своя математическая (или компьютерная) модель и реализованы ВВ. ВВ сложной компьютерной модели осуществляется снизу вверх, т. е. в следующей последовательности: для деталей, узлов и рассматриваемого физического явления или объекта. Этот процесс продемонстрирован на примере ВВ комплексного расчета осевой турбины газотурбинного двигателя. Также затронуты темы, связанные с верификацией и сертификацией программного обеспечения, применяемого для разработки компьютерных моделей, и с ВВ цифровых двойников изделий.

Ключевые слова: верификация и валидация, математическая модель, компьютерная модель, цифровой двойник, газотурбинный двигатель

The paper considers the steps involved in building modern digital simulations, from a conceptual mathematical model to specific simulation settings, for example, meshing parameters. The paper presents a generalised approach to verification and validation of computer simulations and describes its main stages. The approach proposed is based on the assumption that the complex physical phenomena and objects to be simulated have a hierarchical structure that allows them to be split into constituent components (according to their design purpose, such as assemblies or parts, or according to the field of study, such as gas dynamics, combustion, heat transfer, etc.). Each element uses its own mathematical (or digital) model that will have undergone verification and validation. A complex computer simulation is verified and validated from the bottom up, that is, in the following order: individual parts, then assemblies, and finally the physical phenomenon or object under consideration. We consider a case study of verification and validation as pertaining to a comprehensive calculation of axial turbine parameters for a gas turbine engine. We also address issues concerning verification and certification of software used to develop digital simulations, as well as issues concerning verification and validation of digital product twins.

Keywords: verification and validation, mathematical model, computer simulation, digital twin, gas turbine engine

Повышение требований к характеристикам газотурбинных двигателей (ГТД) для обеспечения их надежности, безопасности и экологичности, а также усложнение их конструкции приводит к увеличению объема, времени и стоимости испытаний. Поэтому использование технологий высокопроизводительного компьютерного моделирования с целью сокращения стоимости, сроков подготовки и проведения, а также снижения объемов испытаний и обеспечения их корректности, является крайне актуальной задачей.

При этом возникает проблема верификации и валидации (ВВ) средств компьютерного моделирования (его программного обеспечения — ПО), компьютерных моделей и методик их анализа, лежащих в основе ПО. Верификация моделей осуществляется путем проверки моделей и программных кодов, в которых они написаны, на наличие ошибок и логических несоответствий. Для валидации моделей проводят эксперименты разного вида, в том числе натурные испытания моделируемых изделий.

Однако возникает задача определения возможности применения валидированных таким образом моделей для замены (частичной или полной) испытаний схожих изделий. Решить эту задачу можно только путем комплексных расчетно-экспериментальных исследований, которые включают в себя множество испытаний подобных изделий, их узлов и деталей, моделирование испытаний, анализ и сопоставление результатов.

Необходимость импортозамещения в области ПО компьютерного моделирования для создания моделей сложных физических явлений и систем делает задачу ВВ еще более актуальной. Обсуждению проблем импортозамещения и формированию требований к отечественным программным продуктам в этой области была посвящена секция «Развитие и совершенствование отечественного ПО для проектирования и разработки ГТД в рамках концепции «Цифрового двойника», которая прошла в рамках VIII Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» (16–17 мая 2022 года, г. Рыбинск, Ярославская область).

Основной темой дискуссии, которая состоялась в конце работы секции, являлись обсуждение процесса ВВ и необходимость формирования банка валидационных задач. Ход дискуссии показал отсутствие единого системного подхода

в вопросах ВВ как среди разработчиков ПО компьютерных моделей, так и среди его потребителей. Это послужило одним из основных мотивирующих факторов написания этой статьи. В ней использованы материалы из нескольких работ [1, 2], которые описывают зарубежный опыт в области ВВ программных продуктов различного назначения.

Изложенные в статье предложения рекомендуются применять в процессе обсуждения единого систематизированного подхода в области ВВ, а не в качестве окончательных утверждений.

Валидация и верификация математических моделей. Современная концепция ВВ базируется на работах К. Попера [3] и Р. Карнапа [4]. Проблемы ВВ с точки зрения истории развития философии науки приведены в статье [5].

Достаточно подробные библиографические обзоры представлены в публикациях [6–8]. Обобщая подходы, описанные перечисленных источниках, можно констатировать, что ВВ — это процессы, с помощью которых формируется совокупность доказательств того, что компьютерные модели обладают достаточной достоверностью, точностью и уровнем детализации для их предполагаемого применения.

В государственных стандартах [9–11] использованы следующие определения:

- ПО компьютерного моделирования — программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, а также другие вспомогательные программы;

- компьютерная модель/электронная модель (далее КМ) — модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде, представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с ними (ГОСТ 57412–2017); иногда вместо КМ будем использовать термин «вычислительная модель» или просто «модель»;

- верификация КМ — процесс определения соответствия КМ математической модели; верификация обеспечивает обоснование того, что КМ при определенных параметрах рассчитывает математическую модель правильно и с соответствующей точностью;

- валидация КМ — процесс определения соответствия КМ реальному миру; валидация обеспечивает обоснование того, что КМ в заяв-

ленной области применения позволяет правильно и с определенной точностью моделировать реальные процессы.

Цель работы — формирование единого подхода к процессу верификации и валидации КМ сложных физических объектов или явлений и их составных частей.

В основу предлагаемого подхода к ВВ положено предположение, что, несмотря на сложную структуру и процесс функционирования, многие моделируемые физические системы или явления имеют иерархическую природу. Как показано на рис. 1, физическую систему условно можно разбить на узлы, которые, в свою очередь, состоят из отдельных деталей. Верхний уровень иерархии соответствует самой физической системе. В некоторых случаях можно использовать дополнительные уровни иерархии.

Реальная физическая система состоит из большого количества компонентов, сложных способов их соединений и нелинейного поведения каждого компонента отдельно и в составе системы.

Поэтому неправильным подходом к процессу ВВ данной системы является сопоставление результатов экспериментов и моделирования только на самом высоком уровне иерархии (модель системы), которые рассматривают частные случаи ожидаемых условий эксплуатации, либо идеализированные версии реальной системы.

Такой подход не даст полноценной картины, если результаты испытаний и моделирования не будут согласованы, так как невозможно будет определить, модель какого узла/детали (или дисциплины) является причиной несоответствия. В то же время, даже если наблюдается хорошее совпадение между расчетом и экспе-

риментом, рассматриваемая модель всей системы может содержать в себе значительные ошибки, которые могут быть устранены для данного конкретного испытания совокупностью ошибок среди моделей низшего уровня иерархии.

Для полноценного осуществления процесса ВВ необходимо провести работы (моделирование, эксперимент, сопоставление) на каждом иерархическом уровне и оценить, адекватно ли полученные совокупности моделей и экспериментов учитывают сложные нелинейные взаимодействия между внутренними элементами системы на всех уровнях иерархии.

Рекомендуемый подход к ВВ состоит в том, чтобы разработать иерархию моделируемой физической системы, а затем работать «снизу вверх». То есть необходимо идентифицировать и описать физические явления на каждом уровне иерархии и разработать для каждого из них свои математические модели и методики их ВВ.

При этом под уровнем иерархии можно понимать разделение не только рассматриваемой системы на конструктивные элементы (узлы, детали), но и на дисциплины анализа или другой более подходящий для ВВ способ.

Перед началом ВВ сложной компьютерной модели необходимо разработать общий план ВВ, который должен включать в себя:

- описание выбранной иерархии моделируемой физической системы;
- последовательность ВВ каждого элемента в иерархии;
- описание используемых математических моделей и допустимых областей их применения для каждого элемента иерархии;
- перечень потребных валидационных экспериментов с их подробным описанием;

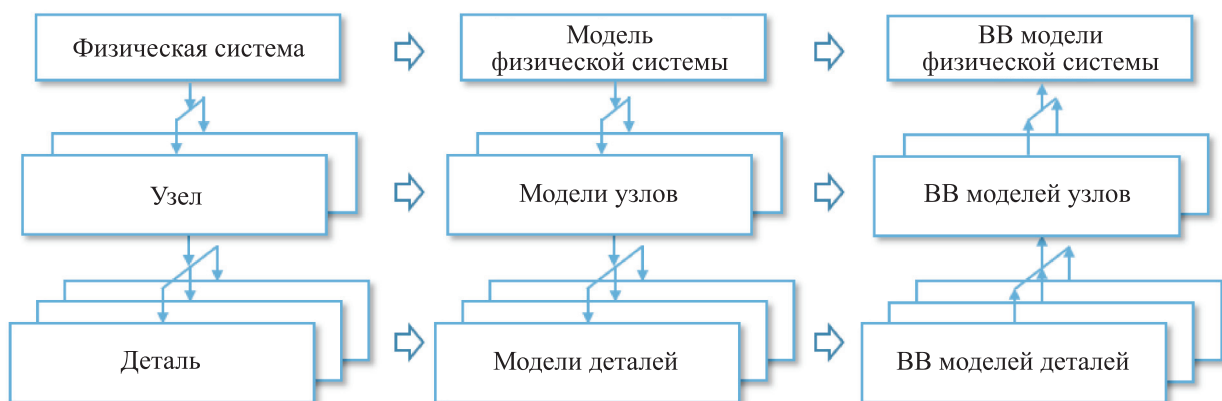


Рис. 1. Иерархическая структура физической системы

- формирование требований к степени соответствия между результатами экспериментов и моделирования в каждом отдельном случае;
- обоснование для каждого из перечисленных пунктов.

Процесс создания плана ВВ обычно носит итерационный характер и включает в себя деятельность инженеров (расчетчиков, экспериментаторов), технических руководителей и экспертов. Формирование структуры «снизу вверх» приведет к созданию многоуровневой совокупности отдельных моделей, на базе которой будет разработана совокупность валидационных экспериментов. Последние необходимо провести для каждого уровня иерархии, чтобы гарантировать, что все модели на конкретном уровне функционируют надлежащим образом.

Структура процесса ВВ. На рис. 2 показана обобщенная структура процесса ВВ для каждо-

го уровня иерархии при подходе «снизу вверх». В левой ветви схемы размещены этапы, связанные с моделированием, в правой — связанные с экспериментом.

Процессы ВВ начинаются с описания предполагаемой области использования модели, дисциплин анализа и определения необходимой (в рамках области применения модели), адекватной и возможной в реализации степени расхождения между результатами использования модели и результатами экспериментов (уровень точности модели).

Моделирование и эксперимент должны ориентироваться на одни и те же выходные данные и требования точности. Одной из целей экспериментов является предоставление информации, необходимой для оценки точности математической и вычислительной моделей.

Также необходимо оценить влияние различных погрешностей, неточностей и неопре-

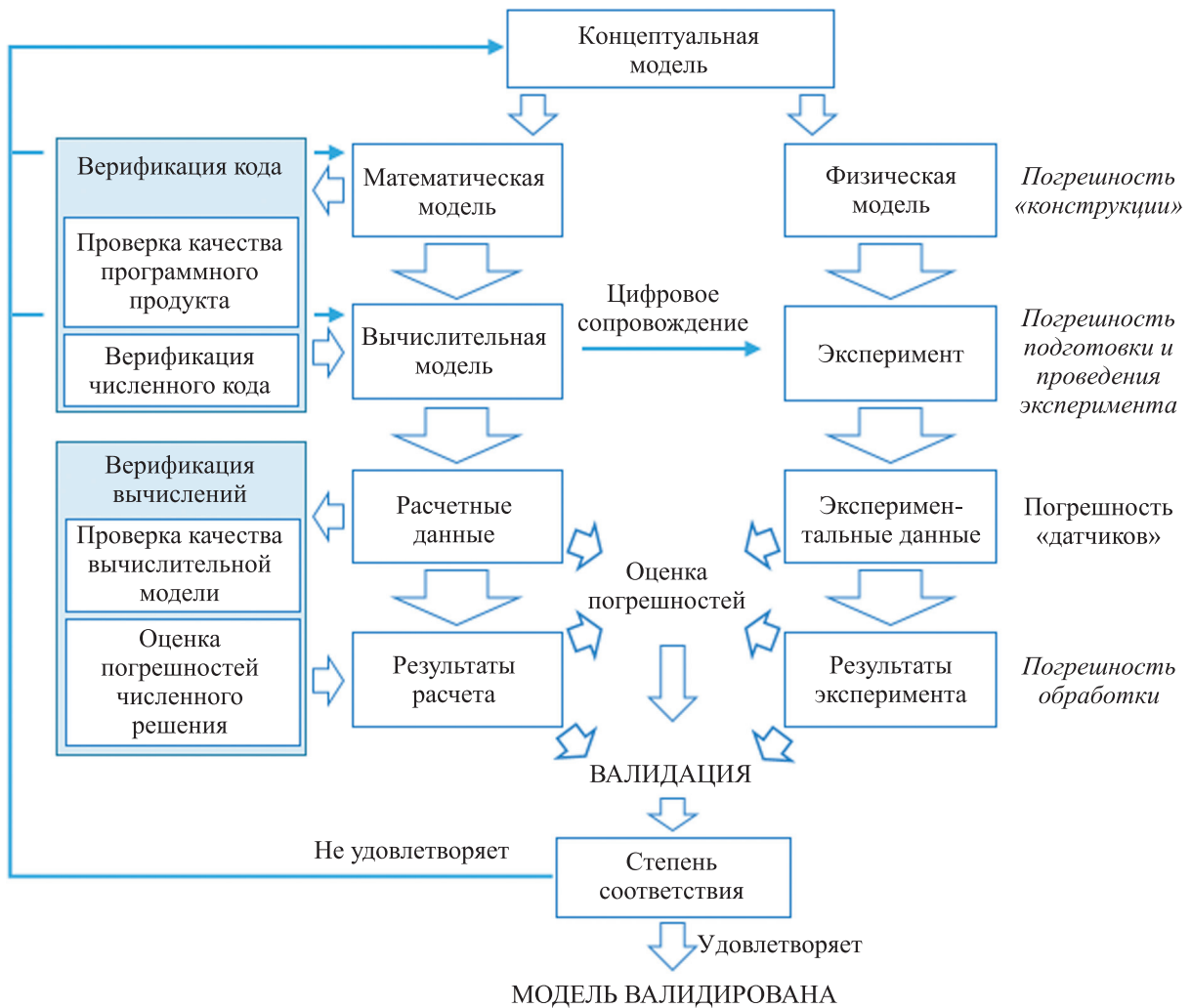


Рис. 2. Обобщенная структура процесса ВВ

деленностей, связанных как с моделированием, так и экспериментом. Если степень расхождения между моделью и экспериментом неприемлема, то процессы ВВ повторяются путем доработки модели и проведения дополнительных испытаний.

Процесс, показанный на рис. 2, повторяется для каждого элемента каждого уровня иерархии в процессе декомпозиции системы, начиная с уровня деталей и продвигаясь вверх до уровня самой системы. При этом процесс идет строго снизу вверх: деталь → узел → система. Это означает, например, что для процесса ВВ какого-либо узла недостаточно провести ВВ каждой его детали. Помимо этого необходимо провести ВВ модели самого узла.

Процесс разработки вычислительной (компьютерной) модели. Процесс разработки вычислительной модели тесно связан с ее ВВ, так как допущенные неточности или первоначальные предположения могут значительно повлиять на результаты сравнения с экспериментом. На рис. 2 в левой ветке приведена последовательность получения вычислительной модели: концептуальная модель → математическая модель → вычислительная (компьютерная) модель.

Концептуальная модель определяется как идеализированное представление рассматриваемой физической системы в выбранных дисциплинах анализа. Разработка концептуальной модели заключается в формировании общего представления физической системы в необходимых дисциплинах анализа, на базе которого можно провести дальнейшее математическое и вычислительное моделирование с уровнем детализации, достаточным для получения результатов с требуемой точностью.

Важным этапом в разработке концептуальной модели является определение того, какие физические процессы в рассматриваемой системе оказывают существенное влияние на ее поведение, определяют ее природу и важны с точки зрения планируемой области использования математической модели (с какой целью модель создают).

Также важно определить, какие физические процессы не оказывают существенного влияния, и обосновать, почему их не надо учитывать при создании концептуальной модели. Дифференциация физических процессов по степени их актуальности (с точки зрения природы системы и предназначения модели) в дальнейшем

позволяет рационально использовать вычислительные мощности, которые будут задействованы при разработке и применении вычислительной модели, так как она не будет проводить вычислений в малоактуальных дисциплинах анализа.

Разработка математической модели состоит в конкретизации математического аппарата дисциплин анализа, выбранных на этапе создания концептуальной модели. Конкретизация осуществляется в рамках рассматриваемой физической системы и назначения модели. Например, математическая модель, разрабатываемая для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) пластины, будет базироваться на общих принципах и уравнениях теории упругости.

Процесс создания такой математической модели в общем случае заключается в выражении в виде уравнений и математических утверждений процесса деформирования пластины, поведения материала, способа учета нагрузок и граничных условий с учетом конструкции пластины.

Вычислительная модель — это численная реализация математической модели, которая будет решена на компьютере для получения расчетных прогнозов (результатов моделирования) поведения системы. Вычислительная модель включает в себя способ и степень пространственной дискретизации конструкции (например, в виде определенного количества конечных элементов), временную дискретизацию используемых уравнений, численные алгоритмы решения этих уравнений и итерационные критерии сходимости численных решений. Важной частью вычислительной модели являются методы генерации расчетных сеток и задаваемые в них параметры дискретизации.

У специалиста может возникнуть соблазн сразу создать вычислительную модель с применением инструментария удобного для него и общепринятого в его области ПО. Однако важно пройти (или хотя бы знать и понимать) этапы концептуального, математического моделирования и разработки общих принципов численных алгоритмов, применяемых в вычислительной модели.

Такой подход дает полное представление о том, какие допущения и математические упрощения лежат в основе используемой вычислительной модели. Отсутствие понимания концептуальных и математических допущений,

лежащих в основе этой модели, может привести к неправильной оценке ее точности и неадекватному и неуместному применению.

Описание процесса верификации. *Верификация* — процесс определения того, что вычислительная модель точно представляет лежащую в ее основе математическую модель и ее решение. Верификация осуществляется путем сравнения результатов вычислительной модели с результатами достоверной математической модели (например, с аналитическим решением).

Верификацию проводят на этапе разработки вычислительной модели, предшествуя ее валидации. В процессе верификации рассматривают вопросы, связанные с численным анализом, качеством ПО, ошибками программирования в компьютерном коде и оценкой численных ошибок. Верификация включает в себя два этапа: верификацию кода и вычислений.

Верификация кода — это оценочная деятельность, связанная с поиском и исправлением ошибок программирования в компьютерном коде и обеспечением того, чтобы численные алгоритмы решения дискретных уравнений давали точные решения относительно «истинных» решений используемых математических уравнений.

Верификация вычислений — это оценочная деятельность, связанная с проверкой качества вычислительной модели и выявлением ошибок численного решения, которые обусловлены получением, обработкой и представлением результатов моделирования (например, ошибка временной и пространственной дискретизации, итерационная ошибка или ошибка округления).

Процесс верификации кода логически можно подразделить на два этапа.

Первый этап — *верификация численного кода*, которая связана с конкретной реализацией дискретных алгоритмов решения используемых математических уравнений. Цель такой верификации состоит в том, чтобы убедиться, что алгоритмы численного решения правильно реализованы (запрограммированы) в коде.

Основным способом верификации численного кода является формирование перечня тестовых задач для оценки точности численных алгоритмов и их проверка на этих задачах. Проверка осуществляется путем сравнения результатов численных решений таких задач с «правильными результатами», полученными в

ходе аналитического или высокоточного численного решений (эталонного решения).

Однако на практике задачи, имеющие «правильные решения», описывают небольшое количество относительно простых случаев, которые обычно затрагивают только ограниченную часть кода. Поэтому формирование перечня актуальных тестовых задач для полноценной верификации кода является важной и актуальной проблемой.

Рекомендуется для каждого отдельного класса задач моделирования формировать дополнительный перечень тестовых задач с привлечением отраслевых специалистов.

Второй этап — *проверка качества программного обеспечения*, которая решает такие вопросы, как управление конфигурацией ПО, контроль версий, архитектура кода, документация и тестирование. Этот этап связан с поиском и устранением ошибок программирования из программной реализации численных алгоритмов.

Также этап проверки качества ПО определяет, является ли ПО надежным, т. е. дает ли оно надежные результаты на заданном вычислительном оборудовании в совокупности с другим ПО (компиляторами, библиотеками, операционной системой и т. д.).

Процесс верификации вычислений также можно подразделить на два этапа.

Первый этап — *проверка качества и корректности используемой вычислительной модели*. Современное ПО, используемое для создания и анализа вычислительных моделей, обладает обширным инструментарием, который позволяет решать поставленную задачу численного моделирования множеством различных способов.

Поэтому возникает необходимость проверки качества и корректности разработанной в таком ПО вычислительной модели, которая включает в себя оценку правильности выбранных для нее настроек, нагрузок, граничных условий, математического аппарата, применяемых допущений и т. д.

Такую проверку выполняют путем сравнения вычислительной модели (структура, настройка, граничные условия (ГУ) и т. д.) и результатов ее анализа с другой эталонной вычислительной моделью, которая прошла процесс ВВ. Обычно эталонная вычислительная модель создается (или уже создана) в другом ПО, которое уже прошло верификацию в рас-

смаатриваемом классе задач, и имеется большой положительный опыт применения данного ПО в этой области.

Второй этап — оценка погрешности численного решения, связанной с дискретизацией. Другим источником ошибок является смещение сетки, при котором расположение элементов может влиять на результаты, особенно если сетка грубая. В большинстве случаев для оценки этой погрешности проводят анализ одной и той же вычислительной модели с использованием нескольких вариантов сеток.

Замечания к процессу верификации. Упрощение конструкции моделируемого объекта. Одна из важных задач, которую часто необходимо решить в процессе верификации вычислительных моделей, — согласование степени упрощения конструкции моделируемого объекта.

Например, при определении газодинамических характеристик турбинной лопатки ГТД конструкцию хвостовика и бандажной полки можно упростить, так как они не влияют на газодинамические характеристики, а их упрощение позволяет значительно снизить время на создание вычислительных моделей.

Однако данные конструктивные элементы необходимо учитывать при оценке прочностных характеристик лопатки. Степень упрощения конструкции объекта и его отдельных элементов должна быть согласована со специалистами на этапе составления плана ВВ и тщательно задокументирована с описанием обоснования.

Верификация процесса и верификация объекта. Процесс верификации условно можно подразделить на два этапа. Целью первого этапа (верификации кода) является подтверждение того, что выбранное ПО корректно реализует заложенный в него математический аппарат, а также не содержит внутренних ошибок.

Условно его можно назвать верификацией процесса, так как путем сравнения с эталонными аналитическими задачами проверяется, насколько правильно в общем случае моделируется нужный специалисту физический процесс (прочность, теплообмен, газодинамика и т. д.).

На втором этапе проверяют корректность прогнозирования характеристик некоторого конкретного объекта в рассматриваемом ПО. Помимо оценки погрешности численного решения, для данного типа задач оценивают инструментарий этого ПО, связанный с приложе-

нием ГУ, нагрузок и возможности реализации внутри ПО конкретной методики расчета и т. д. Поэтому данный этап условно можно назвать верификацией объекта.

Такое условное разделение процесса верификации дает возможность уменьшить объем работ, связанный с ВВ модели, так как позволяет выделить верификацию процесса из общей структуры ВВ в отдельную задачу.

Необходимо для каждой характерной дисциплины анализа сформировать перечень тестовых задач, положительное решение которых в тестируемом ПО подтвердит, что рассматриваемый физический процесс реализован корректно. Это позволяет пропускать этап верификации кода в общем процессе ВВ конкретной модели, если при этом использовано протестированное таким образом ПО.

Перекрестная верификация. В некоторых случаях проведение полноценного валидационного эксперимента является весьма дорогостоящим и трудоемким занятием (например, испытание полноразмерных узлов ГТД на установках).

Однако с помощью моделирования важно предварительно спрогнозировать характеристики такого объекта перед испытанием, чтобы получить некоторую уверенность, что в результате его проведения требуемые характеристики объекта будут подтверждены. Если имеется обширный опыт моделирования подобных объектов, то становится актуальной задача многодисциплинарной верификации сложной компьютерной модели без ее валидации.

Зачастую программная реализация одних и тех же физико-математических моделей неодинаковая в разном ПО. В связи с этим особый интерес представляет перекрестная верификация в различном ПО. Процедуру верификации необходимо выполнять, опираясь на максимально близкие к друг другу физико-математические модели. Хорошая корреляция результатов расчета между различными программными пакетами может служить дополнительным подтверждением достоверности моделирования.

Верификация вычислительной модели (и ее составных частей) осуществляется путем ее сопоставления с другой верифицированной (но необязательно валидированной, хотя это приветствуется) моделью, созданной в другом ПО (или группе ПО), которое прошло процедуру верификации процесса, и имеется значитель-

ный опыт моделирования подобных объектов в данном ПО.

Желательно, чтобы имелся положительный опыт валидации моделей подобных объектов в данном ПО. При этом необходимо использовать иерархический подход и осуществлять верификацию «снизу вверх», согласно описанной методологии, вынужденно опуская для каждого элемента иерархии процедуру валидации из-за отсутствия экспериментальных данных.

Таким образом, будет проведено не только сопоставление результатов вычислений, но и осуществлена проверка корректности создания модели, верификации численного кода, а также правильности реализации методики вычислений, принятой среди специалистов в данной области.

Описание процесса валидации. *Валидация* — процесс определения степени, в которой модель является точным представлением рассматриваемой физической системы в рамках предполагаемого периметра ее использования. Валидация осуществляется путем сопоставления результатов моделирования и эксперимента.

Перед началом валидации модели необходимо провести четыре подготовительных этапа:

- четко сформулировать область предполагаемого использования модели;
- определить величины, по которым будет проводиться сравнение результатов моделирования и эксперимента и требуемую степень точности соответствия;
- выполнить верификацию кода и верификацию расчетов, чтобы ошибки, обнаруженные в результате валидации, можно было изолировать от обнаруженных в результате верификации; в некоторых случаях для описания физического явления достаточно использовать математические (не вычислительные) модели; тогда этап верификации опускается;
- провести количественную оценку погрешностей, неточностей и неопределенностей, которые возникают (или могут возникнуть) как в процессе моделирования, так и при проведении эксперимента и анализа его результатов; некоторые аспекты количественной оценки неопределенностей применительно к задачам проектирования узлов ГТД изложены в работе [12].

Валидационные эксперименты и набор измерений в них должны быть разработаны таким образом, чтобы минимизировать количество неизвестных факторов и воздействий. Ес-

ли вычислительная модель предсказывает результаты совокупности экспериментов (заранее выбранных и обоснованных) в пределах заданных требований к точности, то модель считается валидированной в рамках ее предполагаемого использования.

В противном случае проводят корректировку модели, а при необходимости дополнительные эксперименты.

Перед началом валидационного эксперимента необходимо как можно более точно и полно сформировать, описать и задокументировать конструкцию тестируемого объекта и экспериментального оборудования (стенд, средства измерения и т. д.), условия проведения испытаний и способа обработки получаемых данных.

Также надо указать все возможные источники неопределенностей (см. рис. 2) и провести оценку их количественных отклонений для данного испытания. Эта информация будет использована при оценке возможных неточностей и погрешностей, которые необходимо учитывать при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных в процессе валидации.

Для корректировки модели можно использовать четыре направления:

- концептуальное — добавление или модификация применяемых допущений и дисциплин анализа;
- математическое — модификация математических уравнений и математического аппарата, применяемого для их решения;
- вычислительное — модификация численных алгоритмов решения выбранных математических уравнений;
- настройку вычислительной модели — уточнение конструкции и проверка корректности принятых конструктивных допущений, модификация сетки, нагрузок и ГУ, настройки расчета и т. д.

Современные программные комплексы, применяемые для инженерных расчетов, имеют удобный интерфейс и мощный инструментальный для создания и настройки вычислительных моделей. Поэтому наиболее простым с точки зрения реализации является последнее направление.

Однако во многих случаях, особенно при моделировании малоизученных физических систем и явлений, такой подход не всегда позволяет скорректировать модель так, чтобы результаты ее анализа совпадали с данными валидационного эксперимента.

Другой проблемой такого подхода может быть подстройка используемой вычислительной модели под конкретный эксперимент. При этом ошибка/физическая неточность, из-за которой появляется погрешность в модели, не исправляется. Поэтому в процессе корректировки вычислительной модели необходимо проводить анализ возможных причин ее неточностей по всем четырем направлениям.

В процессе валидации следует тщательно документировать каждый этап, связанный как с моделированием, так и с экспериментом. Совокупность документации, созданной при валидации множества моделей, можно объединить в единую базу знаний, используя при повторной валидации или валидации моделей схожих физических систем и явлений.

При этом неудачные случаи валидации также необходимо подробно документировать, поскольку их наличие в базе знаний даст более полное понимание проблем, связанных с моделированием семейств схожих физических систем.

Также документация должна содержать в себе обоснование того, что рассматриваемая модель обладает заданным уровнем точности и соответствует анализируемой системе в рамках ее предназначения. Должны быть описаны ис-

пользуемые методики обоснования и рекомендуемые границы применения модели.

Пример плана верификации и валидации моделей типового ГТД. На примере турбины малоразмерного ГТД, на базе которого специалисты ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» разрабатывают демонстратор цифрового двойника (ЦД) [13], рассмотрим общий подход к верификации и валидации вычислительных моделей.

Общая схема расчета турбины в рамках демонстратора приведена на рис. 3. Для анализа характеристик турбины использовано несколько моделей, связанных между собой:

- гидравлическая модель двигателя;
- тепловая модель двигателя;
- конечно-элементная модель (КЭ-модель) для анализа характеристик прочности;
- газодинамическая модель.

Гидравлическая и тепловая модели объединены в единую модель, которая организует совместный пошаговый нестационарный расчет, целью которого является прямое моделирование прогрева двигателя на выбранной последовательности режимов (получение кинетики теплового состояния в течение типового

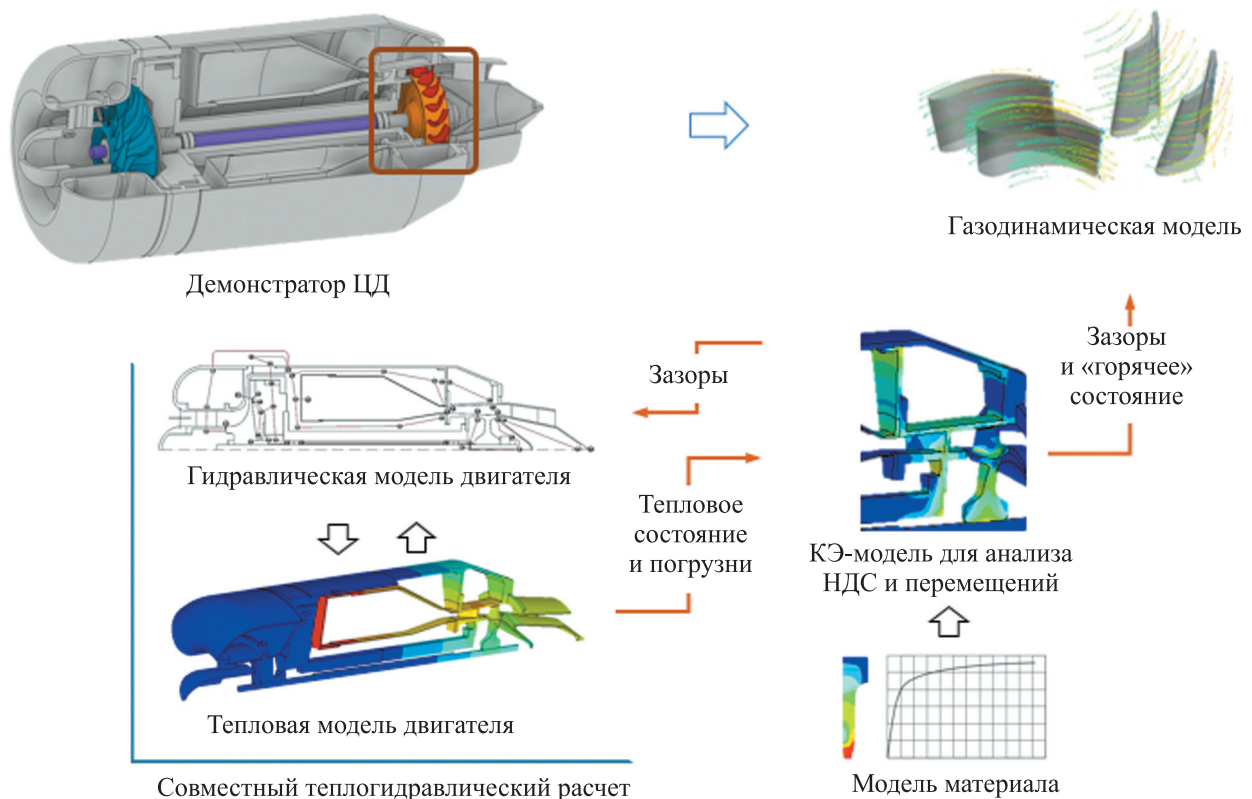


Рис. 3. Схема расчета турбины

полетного цикла). При этом обе модели тесно взаимодействуют между собой, обмениваясь данными и ГУ.

КЭ-модель использует полученное в ходе совместного теплогидравлического расчета тепловое состояние, а также давление газа на поверхности диска. При этом КЭ-модель включает в себя некоторый выбранный из множества существующих на данных момент вариант моделирования поведения материала при нагружении (модель материала). Перемещения, полученные в результате применения КЭ-модели турбины (кинетика радиальных зазоров), используют для корректировки гидравлической модели.

Газодинамическую модель также корректируют на базе перемещений, полученных при анализе НДС: используют горячие размеры лопаток и актуальные значения зазора между ротором и статором.

При необходимости все модели можно объединить в единую комплексную многодисциплинарную модель, однако такой подход будет достаточно трудоемким и потребует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому на практике применяют поэтапный подход, показанный на рис. 3.

Описанная схема является упрощенной, так как не отображает влияние газодинамической

модели на гидравлическую или не содержит в себе модели для анализа собственных частот и циклической долговечности.

Однако она хорошо подходит для демонстрации описанного подхода к процессу ВВ сложной расчетной задачи. Более подробно взаимосвязь тепловой, гидравлической, прочностной и газодинамической моделей рассмотрена на примере моделирования испытаний центробежного компрессора в работе [14].

Создание плана верификации и валидации. Первым этапом ВВ является разделение сложного комплексного расчета на несколько подмоделей и составление плана ВВ на базе этой схемы. Схема разбиения на составные части приведена на рис. 4.

Для комплексного расчета турбины возможны два варианта проведения валидационного эксперимента: испытание турбины в составе двигателя и ее изолированное стендовое испытание.

В первом случае экспериментальным путем можно определить только интегральные характеристики турбины, в том числе косвенно, по результатам термодинамической увязки результатов испытаний. Это происходит из-за сложности размещения внутри двигателя достаточного количества средств измерения без влияния на его работу.

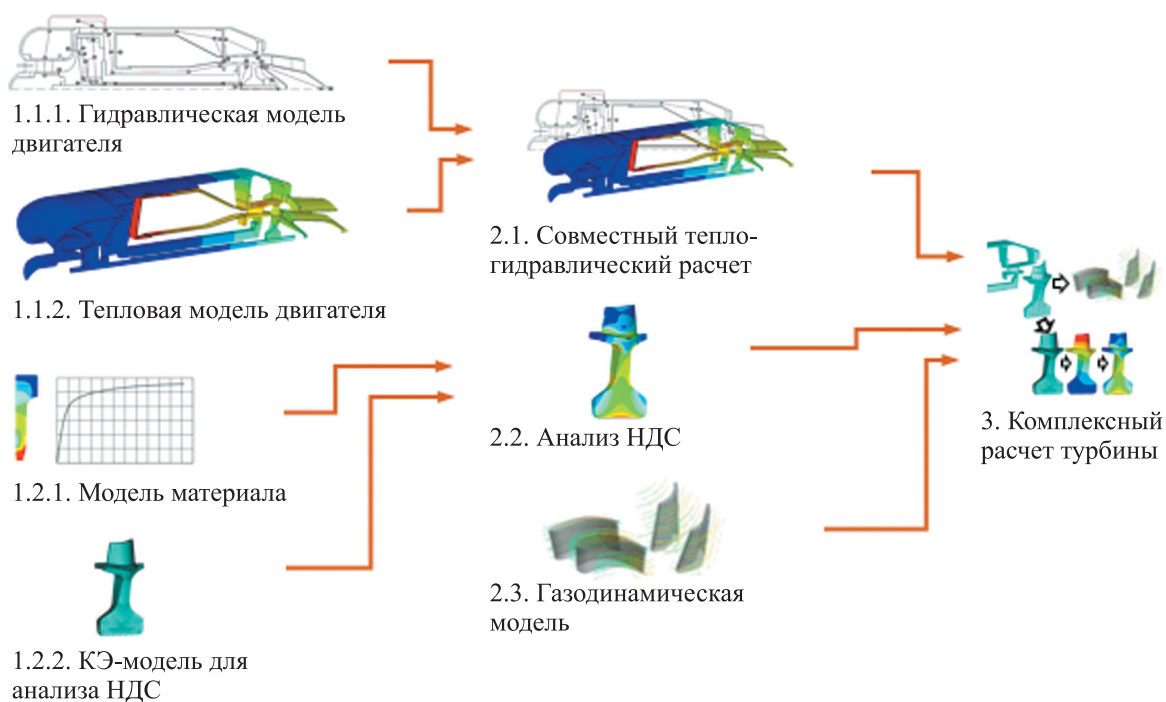


Рис. 4. Схема разбиения комплексного расчета на составные части

Во втором случае имеется возможность получить больше экспериментальных данных. Однако стендовые испытания являются весьма трудоемкими и дорогостоящими и требуют специальной дополнительной подготовки, вследствие чего для малоразмерных двигателей их почти не проводят. Поэтому в данном примере в качестве итогового валидационного эксперимента выбран первый вариант.

Выбор итогового способа валидации комплексной модели и его обоснование является важной частью разработки плана ВВ, так как дает общее направление дальнейшего пути ВВ составных частей модели.

В приведенном примере использование двигательных испытаний для валидации приводит к тому, что при ВВ совместной теплогидравлической модели и комплексного расчета турбины необходимо использовать модели всего двигателя, а не стенда.

При этом комплексная модель может включать в себя только узел турбины, а остальные части двигателя заменяются согласно общепринятым в отрасли методикам либо ГУ, либо эквивалентными нагрузками, либо учитываются в виде упрощенных моделей. Итоговый подход к созданию комплексной модели и его обоснование также следует выбирать на этапе формирования общего плана ВВ.

План верификации и валидации включает в себя следующие этапы:

- 1) ВВ гидравлической модели;
- 2) ВВ тепловой модели;
- 3) ВВ выбранной модели материала;
- 4) ВВ КЭ-модели для анализа НДС;
- 5) ВВ газодинамической модели;
- 6) ВВ совместной термогидравлической модели;
- 7) ВВ комплексной расчетной модели турбины;
- 8) документирование процесса ВВ и его результатов

По структуре этапы похожи, поэтому подробно покажем только состав первого этапа — ВВ гидравлической модели. Для остальных этапов будут приведены только замечания, касающиеся их небольших различий.

Этап 1 (гидравлическая модель двигателя).
Верификация гидравлической модели. *Верификация кода (верификация численного кода):*

- формирование с привлечением специалистов в данной области набора аналитических

задач, которые содержат в себе точные аналитические решения всех типов каналов в гидравлической модели;

- выбор выходных сравниваемых характеристик для каждой задачи и допустимой величины отклонения;
- решение аналитических задач в выбранном ПО и сопоставление результатов;
- доработка ПО в случае получения неудовлетворительных результатов.

Верификация кода (проверка качества ПО) включает в себя:

- формирование набора специальных аналитических задач для поиска возможных ошибок в коде выбранного ПО;
- повторение действий из предыдущего пункта.

Верификация вычислений (проверка качества и корректности используемой вычислительной модели):

- выбор «достоверного» ПО (например, «Слитенко»), в котором у инженера имеется большой опыт создания гидравлических моделей ГТД и для которого имеются верифицированные и валидированные решения;
- формирование перечня гидравлических задач для типовых конструктивных элементов двигателя;
- создание гидравлической модели двигателя в «достоверном» и выбранном ПО;
- оценка корректности инструментария проверяемого ПО (приложения ГУ, нагрузок, организации расчета и т. д.) и его доработка при необходимости;
- выбор сравниваемых характеристик и допустимых величин отклонений;
- проведение вычислений, сопоставление результатов, доработка ПО при необходимости.

Верификация вычислений (оценка погрешности численного решения):

- для каждой из созданных задач формирование группы постановок с различными значениями дискретных параметров вычислительной модели (временной шаг, число подитераций и т. д.)
- создание моделей в выбранном ПО и их решение во всех указанных постановках;
- определение возможных отклонений из-за некорректного задания дискретных параметров модели;
- разработка рекомендаций (или требований) по выбору дискретных параметров.

Валидация гидравлической модели. Вследствие особенностей гидравлической модели (тесная связь с тепловой моделью) проведение изолированного эксперимента (или серии) с целью ее валидации является невозможным. Однако можно провести серию валидационных экспериментов с целью подтверждения корректности анализа всех используемых в модели типов каналов. Для каждого отдельного типа проводят свою серию испытаний.

Этапы 2–5 (тепловая, прочностная и газодинамическая модели, а также модель материала). Эти этапы имеют ту же структуру процесса верификации, что и этап 1. **Верификация** каждой из моделей включает в себя:

- перечень задач для верификации численного кода, в состав которого входит согласованный набор характерных аналитических задач;
- перечень задач для проверки качества ПО, содержащий специализированный набор характерных задач именно для выявления ошибок в коде и оценки корректности его работы;
- перечень задач для проверки качества и корректности используемой вычислительной модели, который включает в себя задачи оценки характеристик в нужных дисциплинах типовых конструктивных элементов (например, определение теплового состояния и НДС дисков и лопаток, оценка газодинамических характеристик лопаток и т. д.); на базе этих задач создается «сетка» дискретных параметров для оценки погрешности численного решения.

Валидацию рекомендуется проводить на базе тех постановок (конструкция объекта, ГУ, нагрузки и т. д.), которые рассматривались в процессе проверки качества и корректности используемых вычислительных моделей. В то же время, желательно, еще на этапе написания общего плана ВВ комплексной модели турбины сформировать для каждой ее составной части перечень валидационных экспериментов и учесть их в процессе создания наборов верификационных задач.

Валидация тепловой, прочностной, газодинамической модели и модели материала включает в себя следующие шаги:

- формирование совокупности валидационных экспериментов (желательно на базе созданного ранее набора тестовых задач);
- создание перечня результатов экспериментов, по которым будет проводиться сравнение с моделированием;

- анализ процесса проведения испытаний и оценка погрешностей, связанных с особенностями экспериментального оборудования и допустимых отклонений измерительных приборов;

- формирование программы испытаний с учетом результатов моделирования (предельная нагрузка, полученная в ходе моделирования, место установки датчиков и т. д.);

- проведение испытаний;
- обработка результатов, оценка погрешности, связанной с их обработкой;

- определение степени совпадения результатов испытаний и моделирования с учетом погрешностей моделирования и испытаний;

- валидация модели путем сопоставления результатов моделирования и испытаний;

- в случае получения неудовлетворительных результатов валидации корректировка модели и повторение процесса.

Этап 6 (совместная термогидравлическая модель). **Верификация совместной термогидравлической модели двигателя.** На этом этапе можно опустить часть, связанную с верификацией численного кода, так как составные части, а именно тепловая и гидравлическая, уже были проверены в ходе первого и второго этапов общего процесса ВВ.

Однако важно составить и решить ряд тестовых задач с целью проверки правильности передачи данных между составными частями составной модели (осуществить проверку качества ПО).

Верификация вычислений (проверка качества и корректности используемой вычислительной модели):

- выбор пар «достоверного» ПО (например, ANSYS+Слитенко), в которых имеется большой опыт решения совместных термогидравлических задач и верифицированные и валидированные совместные модели;

- создание совместной теплогидравлической модели двигателя в «достоверном» и тестируемом ПО; оценка возможностей и корректности инструментария тестируемого ПО;

- решение и сопоставление результатов.

Верификацию вычислений (оценка погрешности численного решения) проводят так же, как и для других составных частей. С использованием моделей, полученных при проверке качества и корректности используемой вычислительной модели, создается «сетка» для дискрет-

ных параметров, на базе которой проводят серию расчетов. По результатам формируют рекомендации.

Валидация совместной теплогидравлической модели двигателя:

- проведение испытаний двигателя с целью его термометрирования;
- корректировка тепловой и гидравлической моделей для получения требуемых значений отклонений расчетных результатов от экспериментальных.

Этап 7 (комплексная модель турбины). Верификация комплексной модели турбины. Как и в случае совместной термогидравлической модели, часть, связанная с верификацией численного кода, пропускается, и проводится только проверка качества ПО. Схожим образом решают задачу верификации вычислений комплексной модели турбины — выбирают группу «достоверного» ПО, в котором создают комплексную модель. Затем проводят сравнение инструментария и результатов. Погрешность численного решения оценивают так же, как и на этапе 6.

Валидацию комплексной модели турбины проводят путем сопоставления результатов верифицированной комплексной модели турбины в составе двигателя с результатами испытаний двигателя.

Как уже отмечалось, весь процесс ВВ комплексного расчета должен быть сформирован еще перед началом проведения вычислений и испытаний и подробно прописан в общем плане ВВ. Такой подход позволяет проанализировать весь объем необходимых работ и организовать его так, чтобы снизить комплексные неопределенности, а также уменьшить общую трудоемкость путем использования схожих (а иногда одних и тех же) моделей и испытаний на разных этапах ВВ.

Процесс верификации и сертификации ПО. Исходя из приведенного примера процесса ВВ, а также описанного условного разделения верификации, предлагается выделить следующие уровни достоверности применяемого ПО:

- верифицированное в дисциплине анализа ПО;
- сертифицированное ПО в классе задач численного определения характеристик физической системы/объекта определенного типа;

ПО предлагается считать верифицированным в данной дисциплине анализа, если осу-

ществлена верификация кода (верификация численного кода и проверка качества ПО) данного ПО, т. е. решение совокупности тестовых задач в анализируемой дисциплине дало положительный результат.

Перечень задач должен формироваться специальной экспертной группой. При этом можно использовать уже имеющиеся и широко применяемые за рубежом группы тестовых задач.

ПО можно считать **сертифицированным в классе задач численного определения характеристик физической системы/объекта определенного типа** в следующих случаях:

- если ПО верифицировано в используемых дисциплинах анализа;
- имеются положительные результаты ВВ «снизу вверх» (учет иерархии для сложных комплексных систем) для нескольких случаев задач моделирования подобных физических систем/объектов; выбор конкретных случаев и их количество должна определять и утверждать специально созданная для этого группа экспертов в данном классе задач моделирования.

Однако качество прогнозирования вычислительных моделей зависит не только от уровня достоверности ПО, в котором они созданы, но и от квалификации специалистов, их разрабатывающих, применяемых методик моделирования и многих других факторов.

Поэтому сертификация ПО в каком-либо классе задач означает лишь, что данное ПО пригодно для решения этого класса задач. При этом модель, созданная в таком ПО, не будет автоматически считаться валидированной, т. е. процедуру ВВ потребуется проводить для каждого конкретного случая моделирования, тщательно документируя весь процесс.

Верификация и валидация цифрового двойника. Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021, цифровой двойник изделия — это система, состоящая из его цифровой модели и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями. При этом важной частью ЦД является матрица требований и цифровая платформа, на которой он базируется [15].

Таким образом, можно выделить следующие признаки того, что ЦД изделия является верифицированным:

- цифровая платформа апробирована, т. е. прошла серию специальных тестов с целью проверки качества программного кода;

- проведена экспертиза матрицы требований итогового варианта изделия, т. е. специалистами проведена проверка совокупности требований на ее полноту (все необходимые требования учтены) и корректность их формулировок;

- верифицированы все вычислительные модели, входящие в ЦД;

- проверены все данные, передаваемые в ЦД из внешних источников (их достоверность, полнота, корректность передачи и т. д.);

- проведена проверка корректности взаимодействия матрицы требований, вычислительных моделей и данных в рамках ЦД.

Предлагаются следующие признаки того, что ЦД валидирован:

- ЦД верифицирован;

- все модели внутри ЦД валидированы;

- выполнение всех требований, для проверки которых не использованы вычислительные модели, подтверждено в результате испытаний.

Выводы

1. Предложен обобщенный концептуальный подход к ВВ компьютерных моделей, различных по уровню сложности и области применения. Даны определения терминов верификации и валидации, подробно описана схема ВВ. Процесс верификации посвящен проверке корректности работы компьютерной модели, для чего верификация условно подразделена на два этапа:

- верификацию процесса, в которую входят проверка качества программного продукта и верификация численного кода; проверка осуществляется путем решения заранее согласованной и утвержденной экспертами совокупности тестовых задач, имеющих аналитическое решение, и сравнения результатов;

- верификацию объекта, в которую входят проверка качества вычислительной модели и оценка погрешностей численного решения; проверка осуществляется путем сравнения с

некоторой эталонной уже верифицированной и валидированной моделью, которая может быть, как вычислительной, так и сложной аналитической, имеющей точное решение.

3. На этапе верификации объекта можно выделить отдельный важный класс задач перекрестной верификации в различном ПО, в ходе которых необходимо предварительно оценить точность и корректность вычисления характеристик некоторой сложной физической системы, испытания которой весьма трудоемки и дорогостоящи. В этих целях проводят сравнение с многодисциплинарной моделью (и результатами ее анализа), созданной в ПО, в котором имеется множество примеров ВВ подобных систем.

4. Этап валидации посвящен определению степени соответствия КМ действительности. Для этого сравнивают результаты применения КМ и испытаний. Поэтому на этапе валидации необходимо тщательно описывать объект испытания, испытательный стенд, средства измерения, а также процессы подготовки и проведения эксперимента, получения и обработки результатов. При этом необходимо оценивать все возможные виды неопределенностей и погрешностей, которые могут возникнуть в ходе испытания, и учитывать их в процессе выбора допустимой степени отклонения результатов моделирования от данных эксперимента.

5. Для сложных физических систем предложен иерархический подход к их ВВ «снизу вверх». В этом случае такую систему разделяют на более простые составляющие (по конструкции, по дисциплине и т. д.), для каждой из которых реализуют отдельный процесс ВВ. Этот процесс продемонстрирован на примере ВВ комплексного расчета типовой турбины ГТД.

6. Затронуты темы, связанные с верификацией и сертификацией ПО, применяемого для разработки математических моделей, с верификацией и валидацией ЦД изделий.

Литература

- [1] *Guide for verification and validation in computational solid mechanics*. ASME, 2006. 28 p.
- [2] *Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations*. AIAA-G-077-1998. AIAA, 1998. 44 p.
- [3] Popper K.R. *The logic of scientific discovery*. Basic Books, 1959. 479 p.
- [4] Carnap R. Testability and meaning. *Philos. Sci.*, 1936, vol. 3, no. 4, pp. 419–471.
- [5] Kleindorfer G.B., O'Neill L., Ganeshan R. Validation in simulation: various positions in the philosophy of science. *Manage. Sci.*, 1998, vol. 44, no. 8, pp. 1021–1066, doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.8.1087>

- [6] Balci O., Sargent R.G. A bibliography on the credibility assessment and validation of simulation and mathematical models. *Simuletter*, 1984, vol. 15, no. 3, pp. 15–27.
- [7] Hamilton M.A. Model validation: an annotated bibliography. *Commun. Stat. – Theory Methods*, 1991, vol. 20, no. 7, pp. 2207–2266, doi: <https://doi.org/10.1080/03610929108830628>
- [8] Oberkampf W.L. *Bibliography for verification and validation in computational simulation*. SAND98-2041. Sandia National Laboratories, 1998.
- [9] ГОСТ Р 57700.1–2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования. Москва, Стандартинформ, 2018. 10 с.
- [10] ГОСТ Р 57700.2–2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения. Москва, Стандартинформ, 2018. 5 с.
- [11] ГОСТ Р 57700.24–2020. Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис. Москва, Стандартинформ, 2020. 5 с.
- [12] Vinogradov K.A., Kretinin G.V., Leshenko I.A. et al. Robust multiphysics optimization for fan blade aerodynamic efficiency, structural properties and flutter sensitivity. *ASME Turbo Expo*, 2018, vol. 2D, paper GT2018-76816, doi: <https://doi.org/10.1115/GT2018-76816>
- [13] Сальников А.В., Данилов М.А., Чистов К.А. и др. Разработка демонстратора «цифрового двойника» ГТД. *ICAM-2020*. Т. 1. Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2021, с. 231–234.
- [14] Темис Ю.М., Соловьева А.В., Журенков Ю.Н. и др. Цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного ГТД. *Авиационные двигатели*, 2021, № 1, с. 5–16, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2021_1_5
- [15] Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н. и др. Цифровые двойники — платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 4, с. 60–72, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-4-60-72>

References

- [1] *Guide for verification and validation in computational solid mechanics*. ASME, 2006. 28 p.
- [2] *Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations*. AIAA-G-077-1998. AIAA, 1998. 44 p.
- [3] Popper K.R. *The logic of scientific discovery*. Basic Books, 1959. 479 p.
- [4] Carnap R. Testability and meaning. *Philos. Sci.*, 1936, vol. 3, no. 4, pp. 419–471.
- [5] Kleindorfer G.B., O’Neill L., Ganeshan R. Validation in simulation: various positions in the philosophy of science. *Manage. Sci.*, 1998, vol. 44, no. 8, pp. 1021–1066, doi: <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.8.1087>
- [6] Balci O., Sargent R.G. A bibliography on the credibility assessment and validation of simulation and mathematical models. *Simuletter*, 1984, vol. 15, no. 3, pp. 15–27.
- [7] Hamilton M.A. Model validation: an annotated bibliography. *Commun. Stat. — Theory Methods*, 1991, vol. 20, no. 7, pp. 2207–2266, doi: <https://doi.org/10.1080/03610929108830628>
- [8] Oberkampf W.L. *Bibliography for verification and validation in computational simulation*. SAND98-2041. Sandia National Laboratories, 1998.
- [9] ГОСТ Р 57700.1–2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования [State standard GOST R 57700.1–2017. Numerical simulation for the development and commissioning of high-tech industrial products. Software certification. Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 10 p. (In Russ.).
- [10] ГОСТ Р 57700.2–2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения [State standard GOST R 57700.2–2017. Numerical simulation for the development and commissioning of high-tech industrial products. Software certification. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 5 p. (In Russ.).
- [11] ГОСТ Р 57700.24–2020. Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис [State standard GOST R 57700.24–2020. Computer models and simulation. Validation basis]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 5 p. (In Russ.).

- [12] Vinogradov K.A., Kretinin G.V., Leshenko I.A. et al. Robust multiphysics optimization for fan blade aerodynamic efficiency, structural properties and flutter sensitivity. *ASME Turbo Expo*, 2018, vol. 2D, paper GT2018-76816, doi: <https://doi.org/10.1115/GT2018-76816>
- [13] Salnikov A.V., Danilov M.A., Chistov K.A. et al. [Development of digital twin demonstrator for gas turbine engine]. *ICAM-2020*. Т. 1 [ICAM-2020. Vol. 1]. Moscow, TsIAM im. P.I. Baranova Publ., 2021, pp. 231–234. (In Russ.).
- [14] Temis Yu.M., Solovyeva A.V., Zhurenkov Yu.N. et al. Digital twin of rig for testing of centrifugal compressor for small-scale gas turbine engine. *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines], 2021, no. 1, pp. 5–16, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2021_1_5 (in Russ.).
- [15] Salnikov A.V., Gordin M.V., Shmotin Yu.N. et al. Digital twins - a platform for aircraft engine lifecycle management. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 4, pp. 60–72, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-4-60-72> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.07.2022

Информация об авторах

САЛЬНИКОВ Антон Владелинович — начальник отдела «Цифровое сопровождение жизненного цикла ГТД». ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: avsalnikov@ciam.ru).

ФРАНЦУЗОВ Максим Сергеевич — заместитель начальника отдела «Цифровое сопровождение жизненного цикла ГТД». ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: msfrantsuzov@ciam.ru).

ВИНОГРАДОВ Кирилл Андреевич — кандидат технических наук, заместитель начальника ОКБ-1 по расчетно-исследовательским работам. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Российская Федерация, пр. Ленина, 163, e-mail: kirill.vinogradov@uec-saturn.ru).

ПЯТУНИН Кирилл Романович — начальник конструкторского отдела систем инженерного анализа. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Российская Федерация, пр. Ленина, 163, e-mail: kirill.pyatunin@uec-saturn.ru).

НИКУЛИН Александр Сергеевич — руководитель направления «Высокопроизводительные вычисления и цифровые двойники изделий». АО «ОДК» (105118, Москва, проспект Буденного, д. 16, e-mail: a.nikulin@uecrus.com).

Information about the authors

SALNIKOV Anton Vladelinovich — Head of Department of Digital Support of Gas Turbine Engine Life Cycle. P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: avsalnikov@ciam.ru).

FRANTSUZOV Maksim Sergeevich — Deputy Head of Department of Digital Support of Gas Turbine Engine Life Cycle. P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: msfrantsuzov@ciam.ru).

VINOGRADOV Kirill Andreevich — Candidate of Science (Eng.), Deputy Head of the 1st Experimental Design Office for Computation and Research. PJSC UEC-Saturn (152903, Rybinsk, Russian Federation, Lenina Ave., Bldg. 163, e-mail: kirill.vinogradov@uec-saturn.ru).

PYATUNIN Kirill Romanovich — Head of Design Department of Engineering Analysis Systems. PJSC UEC-Saturn (152903, Rybinsk, Russian Federation, Lenina Ave., Bldg. 163, e-mail: kirill.pyatunin@uec-saturn.ru).

NIKULIN Alexandr Sergeevich — Head of Department of High-Performance Computing and Digital Product Twins. JSC United Engine Corporation (105118, Moscow, Russian Federation, Budennogo Ave., Bldg. 16, e-mail: a.nikulin@uecrus.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и валидация компьютерных моделей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 9, с. 100–115, doi: [10.18698/0536-1044-2022-9-100-115](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-100-115)

Please cite this article in English as:

Salnikov A.V., Frantsuzov M.S., Vinogradov K.A., Pyatunin K.R., Nikulin A.S. Digital Simulation Verification and Validation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 9, pp. 100–115, doi: [10.18698/0536-1044-2022-9-100-115](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-100-115)