

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ – II

Методы математического моделирования и
комплексы программ



Светлана Сытова
Институт ядерных проблем
Белгосуниверситета
sytova@inp.bsu.by

Основные этапы исследования

1. Что такое моделирование.
2. Основные уравнения для математического моделирования вакуумных электронных приборов.
3. Основные методы математического моделирования.
4. Известные комплексы программ.
5. Проблемы валидации и верификации комплексов программ.
6. Численные методы моделирования ОЛСЭ.

Цель – рассмотреть кратко методы математического моделирования, применяемые для моделирования вакуумных электронных приборов, и дать обзор комплексов программ для их моделирования.

Основные понятия процесса моделирования*

Модель. Физическое, математическое или иное логическое представление системы, объекта, явления или процесса.

Моделирование. Разработка и использование живых, виртуальных и конструктивных моделей, включая симуляторы, стимуляторы, эмуляторы и прототипы, для исследования, понимания или предоставления экспериментального стимула либо (1) концептуальным системам, которые не существуют, либо (2) системам реальной жизни, которые не могут принимать эксперименты или наблюдения из-за ресурсов, диапазона, безопасности или ограничений безопасности.

Моделирование (симуляция). Метод реализации модели с течением времени.

Верификация. Процесс определения того, что реализация модели точно представляет концептуальное описание и спецификации разработчика.

Валидация. Процесс определения степени, в которой модель является точным представлением реального мира с точки зрения предполагаемого использования модели.

***Department of Defense, Instruction number 5000.61: “Modeling and Simulation (M&S) Verification, Validation, and Accreditation”, 1996, 15 p.**

Этапы процесса моделирования*

1. Выбор подходящей математической модели.
2. Классификация дифференциальных уравнений в частных производных.
3. Преобразование математической модели.
4. Выбор шаблона сетки.
5. Формирование конечно-разностных уравнений.
6. Алгоритм решения
7. Выполнение вычислений.
8. Верификация и валидация

***Mahaffy J. Verification and Validation of Codes and Results**

<http://www.personal.psu.edu/users/j/h/jhm/ME540/lectures/VandV/VandV.html>

Метод медленно меняющихся амплитуд

Для описания электромагнитных полей используются уравнения Максвелла, часто с использованием приближения медленно меняющихся амплитуд (англ. – slowly varying envelope approximation (SVEA)), впервые предложенного ван дер Полем (и часто носящим его имя).

Уравнения Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

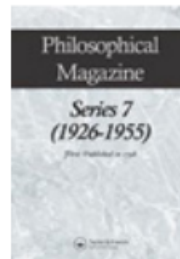
$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_b,$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi \rho_b,$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Вектор $\mathbf{E}$ описывает напряженность электрического поля, вектор $\mathbf{D}$ – электрическая индукция, вектор $\mathbf{H}$ – напряженность магнитного поля, вектор $\mathbf{B}$ – магнитная индукция, ρ_b , $\mathbf{j}_b$ – плотности электронного пучка и тока электронного пучка.

$$\left| \frac{1}{\omega} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right| \ll |\mathbf{E}|, \quad \left| \frac{1}{k} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \right| \ll |\mathbf{E}|, \quad \left| \frac{1}{k} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} \right| \ll |\mathbf{E}|, \quad \left| \frac{1}{k} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right| \ll |\mathbf{E}|, \quad k = \omega / c$$



Philosophical Magazine Series 7

Publication details, including instructions for authors and subscription information: <http://www.tandfonline.com/loi/tphm18>

VII. Forced oscillations in a circuit with non-linear resistance. (Reception with reactive triode)

Balth. van der Pol J un. D.Sc. ^a

^a Physical Laboratory, N. V. Philips' Glowlamp Works, Eindhoven, Holland
Published online: 01 Apr 2009.

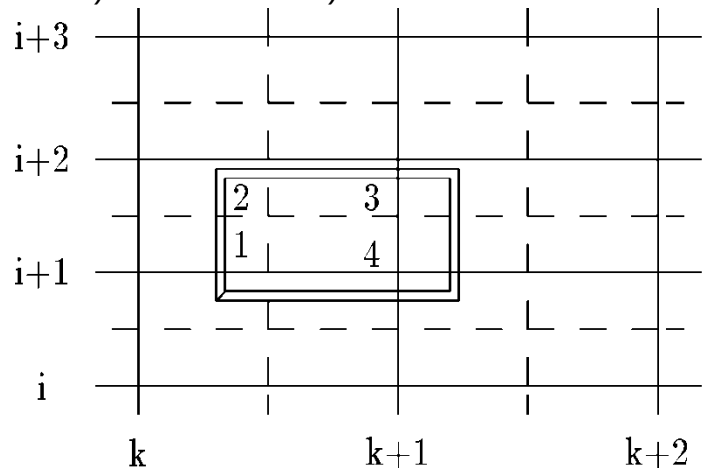
Н. Д. Папалекси и др. Некоторые исследования в области нелинейных колебаний, проведённые в СССР, начиная с 1935 г. УФН. 1947. Т. 33. С. 335–352.

F. Arecchi, R. Bonifacio. Theory of optical maser amplifiers. IEEE J. Quantum Electronics. 1963. Vol.1. P. 169–178.

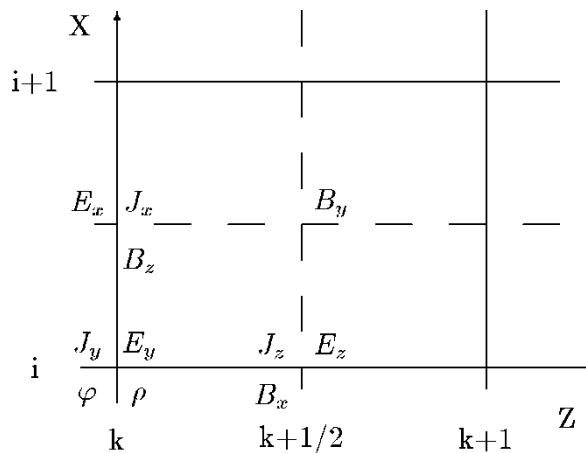
Методы численного моделирования

Динамику взаимодействия электронов с полем можно моделировать несколькими способами: метод крупных частиц, гидродинамическое приближение и метод усреднения фаз электронов. В рамках метода крупных частиц используется феноменологическое упрощение модели сплошной среды путем замены ее системой частиц.

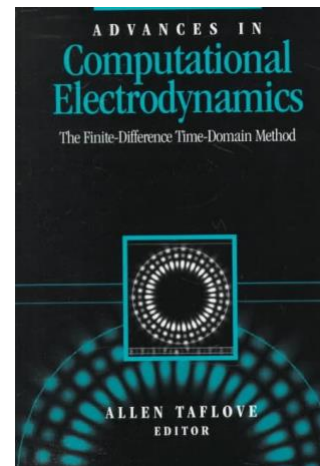
При решении нестационарных электродинамических задач для электромагнитных полей, в том числе полной системы уравнений Максвелла, активно применяется метод конечных разностей во временной области – разностная схема с перешагиванием на прямоугольных сетках со сдвигом (в английском варианте – метод FDTD (Finite-difference time-domain) или схема Yee)*.



Сетка с расположением на ней макрочастицы



Алгоритм с перешагиванием на разностной сетке



Yee K. S. IEEE Trans. 1966. Vol. 14, No. 3. P. 302–307.

Taflove A., Hagness S. C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 1995.

1D система уравнений для ЛОВ, ЛБВ, ЛСЭ, МСЭ и т.д.*

$$\partial^2 \theta / \partial \zeta^2 = -\operatorname{Re} [F \exp(i\theta)], \quad \partial F / \partial \tau - \partial F / \partial \zeta = \tilde{I}, \quad \tilde{I} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0,$$

$$\theta|_{\zeta=0} = \theta_0, \quad \partial \theta / \partial \zeta|_{\zeta=0} = 0, \quad F|_{\zeta=L} = 0,$$

где θ – фаза электронов пучка, F – амплитуда электромагнитной волны.

Граничные условия для пучка и волны поставлены на разных границах системы:
 $\zeta = 0$ и $\zeta = L$ (случай ЛОВ).

***Гинзбург Н.С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ. Известия вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, №7. С. 1037–1052.**

Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике СВЧ. М.: Сов. Радио, 1973. 399 с.

Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т.

Уравнения для мазера на свободных электронах*

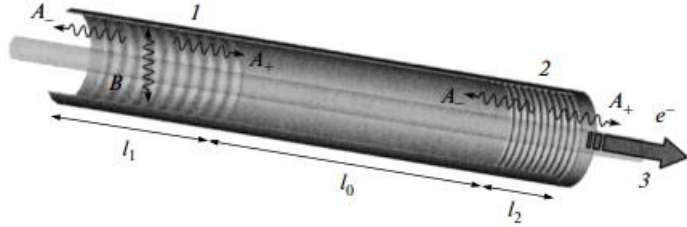


Fig. 1. Schematic diagram of a FEM with a combined double-mirror resonator: (1) modified Bragg reflector (2) traditional 1D Bragg reflector; (3) electron beam. Wavy lines show the directions of propagation of the electromagnetic flows $A_{\pm}$ and B . The corrugation period of the modified Bragg structure (1) is about twice that of the traditional structure (2).

$$\frac{\partial \hat{A}_+}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{A}_+}{\partial \tau} + i\alpha_1 \hat{B} = J, \quad J = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0, \quad (2a)$$

$$-\frac{\partial \hat{A}_-}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{A}_-}{\partial \tau} + i\alpha_1 \hat{B} = 0, \quad (2b)$$

$$\frac{iC}{2} \frac{\partial^2 \hat{B}}{\partial Z^2} + \frac{\partial \hat{B}}{\partial \tau} + \sigma \hat{B} + i\alpha_1 (\hat{A}_+ + \hat{A}_-) = 0, \quad (2c)$$

where J is the amplitude of the high-frequency electron current that is determined by solving the equations of motion for the charged particles:

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \text{Re}(\hat{A}_+ e^{i\theta}), \quad \theta|_{Z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta \Big|_{Z=0} = \Delta.$$

*N. S. Ginzburg et al. Free Electron Maser with High Selectivity Bragg Resonator Using Coupled Propagating and Trapped Modes. Technical Physics Letters, 2010, Vol. 36. P. 952–956

ПО для моделирования вакуумных электронных приборов*

Название	Описание	Алгоритмы	Платформа	Распараллеливание	Открытое ПО
Parmela	3D particle tracker to simulate the dynamics in rf guns and injector beam lines	Particle Tracking	Linux, Mac	нет	да
Homdyn	Based on analytical formulae of the beam dynamics in rf photo injector. The electron beam is described by longitudinal slices with various lengths and radii, following the envelope equations for the electron beam	Particle Tracking	Linux, Mac	нет	нет
Tredi	A fully 3D particle tracking code, based on the Lienard-Wiechard potential for the electro-magnetic interaction between the macro particles	Particle Tracking, Lienard-Weichert	Linux	да	да
QUINDI	A first principles beam diagnostics simulator which calculates the radiative spectrum from a relativistic electron bunch passing through a magnetic array	Particle Tracking	Linux	да	да
Genesis 1.3	A 3D time-dependent Free-Electron Laser code, simulating the interaction of an electron beam with a radiation field, coupled by the field of an undulator or wiggler	Particle Tracking	Linux, Mac	нет	да
Elegant	A multi-purpose 3D particle Tracking code through a linear accelerator	Lienard-Weichert	Linux, Mac, Win	нет	нет
Spur	Calculates the radiation properties of the spontaneous radiation at a given 2D target behind the undulator for an arbitrary undulator lattice.	Lienard-Weichert	Linux, Mac	да	да
fieldEye	A first-principal code, extracts out of the supplied trajectories of electrons the position, velocity and acceleration with using the Lienard-Weichert potentials	Maxwell Solver	Linux	да	да
Ampere	A 3D magnetostatic field solver using the boundary element method	Maxwell Solver	Win	нет	нет
Poisson/Superfish	Solves magnetostatic problems, calculates the eigenvalues and solutions of rf cavities, 2D, can distinguish between radial (r, z) or cartesian (x,y) symmetry	Maxwell Solver	Linux	нет	да
Gdfidl	A finite difference solver for the Maxwell and Helmholtz equations	Maxwell Solver	Linux	нет	да
Radia	A set of library functions for Mathematica for magnetostatic problems	Maxwell Solver	Mac, Win	нет	нет
HFSS	A 3D electromagnetic simulation tool for RF, wireless, packaging, and optoelectronic design	Plasma Dynamics	Win	нет	нет
Magic	3D simulation plasma dynamics. Particle-in-cell (PIC) code. The problem is solved in the time-domain, based on a finite-difference algorithm.	Plasma Dynamics	Win	нет	нет
OopicPro	A 2D PIC code for plasma simulation	Plasma Dynamics	Linux	да	да
KAPAT	3D самосогласованная электродинамическая модель, PIC, конечно-разностный метод (FDTD) на прямоугольной сетке со сдвигом в пространстве и времени	Plasma Dynamics, Maxwell Solver	Win	нет	нет

*http://pbpl.physics.ucla.edu/Computing/Code_Overview/

Физическая модель кода КАРАТ *

В основе кода лежит трехмерная самосогласованная электродинамическая модель, индуцированные электрические E и магнитные B поля в которой находятся из уравнений Максвелла:

$$\nabla \times B = \frac{4\pi}{c} J + \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}, \tag{2}$$

где J – плотность тока. Поля E и B удовлетворяют различным граничным условиям в зависимости от типов границ счетной области, в том числе идеально проводящих поверхностей, поверхностей с конечной проводимостью, открытых границ. Ввод внешнего электромагнитного импульса, в частности лазерного импульса, осуществляется путем реализации соответствующих типу волны граничных условий. Система (1), (2) решается конечно-разностным методом (FDTD) на прямоугольной сетке со сдвигом в пространстве и во времени.

В настоящей задаче плотность тока в каждой точке системы определяется только в рамках PIC-метода:

$$J = \frac{1}{\Delta V} \sum_s Q_s v_s, \tag{3}$$

где v_s – скорость макрочастицы с номером s ; Q_s – часть

заряда макрочастицы с номером s в данной элементарной ячейке; ΔV – объем элементарной ячейки.

Поскольку электроны могут иметь релятивистские скорости, для описания движения макрочастиц используется релятивистское уравнение движения заряженной частицы в электромагнитном поле

$$\frac{dp_s}{dt} = Q \left(E + \frac{1}{c} v_s \times B \right). \tag{4}$$

Здесь p_s – импульс макрочастицы, причем

$$p_s = m_p v_s \gamma; \quad \gamma = \frac{1}{(1 - v_s^2/c^2)^{1/2}}; \tag{5}$$

$m_p = \eta m$ – масса макрочастицы; $Q = \eta q$ – ее заряд; m и q – масса и заряд реальных плазменных частиц (электронов и ионов); η – параметр укрупнения.

Уравнения (1)–(5) составляют полную систему, позволяющую самосогласованно описывать динамику частиц и генерируемых ими электромагнитных полей.

***С.Н.Андреев, А.А.Рухадзе, В.П.Тараканов, Б.П.Якутов, Квантовая электроника, 2010, т. 40, №1, с.64–67**

Коммерческий продукт

Другие известные коды – Geant4



Download | User Forum
Contact Us | Bug Reports

<http://www.geant4.org/geant4/>
<https://geant4.web.cern.ch/>

Overview

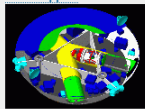
Geant4 is a toolkit for the simulation of the passage of particles through matter. Its areas of application include high energy, nuclear and accelerator physics, as well as studies in medical and space science. The three main reference papers for Geant4 are published in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506 (2003) 250-303, IEEE Transactions on Nuclear Science 53 No. 1 (2006) 270-278, and Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 835 (2016) 186-225.

Applications



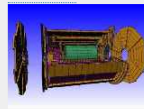
A sampling of applications, technology transfer and other uses of Geant4

User Support



Getting started, guides and information for users and developers

Publications



Validation of Geant4, results from experiments and publications

Collaboration



Who we are: collaborating institutions, members, organization and legal information

News

2021-06-25
Release 11.0-BETA is available from the [BETA Download area](#).

2021-06-14
Patch-02 to release 10.7 is available from the [Download area](#).

2021-03-10
[2021 planned developments](#).

2020-11-06
Patch-03 to release 10.6 is available from the [Download archive area](#).

Geant4 - набор инструментов для моделирования прохождения частиц через вещество. Области применения включают физику высоких энергий, ядерную физику и физику ускорителей, а также исследования в области медицины и космической науки. Моделирование прохождения заряженных частиц через искусственные пространственно-периодические структуры вызывает большие затруднения.

Geant4 - бесплатный программный пакет.

Позволяет моделировать: геометрия системы, материалы, фундаментальные частицы, генерация первичных событий, прохождение частиц через материалы и электромагнитные поля, физические процессы, управляющие взаимодействием частиц, отклик чувствительных компонентов детектора, генерация данных о событиях, хранение событий и треков, визуализация детектора и траекторий частиц, и сбор и анализ данных моделирования на разных уровнях детализации и уточнения.

11

Другие известные коды – CST (Computer Simulation Technology)



CST STUDIO SUITE

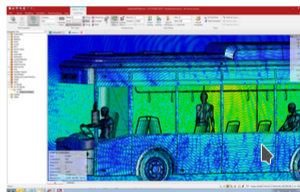
ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION SOFTWARE

CST Studio Suite® is a high-performance 3D EM analysis software package for designing, analyzing and optimizing electromagnetic (EM) components and systems.

Electromagnetic field solvers for applications across the EM spectrum are contained within a single user interface in CST Studio Suite. The solvers can be coupled to perform hybrid simulations, giving engineers the flexibility to analyze whole systems made up of multiple components in an efficient and straightforward way. Co-design with other SIMULIA products allows EM simulation to be integrated into the design flow and drives the development process from the earliest stages.

Common subjects of EM analysis include the performance and efficiency of antennas and filters, electromagnetic compatibility and interference (EMC/EMI), exposure of the human body to EM fields, electro-mechanical effects in motors and generators, and thermal effects in high-power devices.

CST Studio Suite is used in leading technology and engineering companies around the world. It offers considerable product to market advantages, facilitating shorter development cycles and reduced costs. Simulation enables the use of virtual prototyping. Device performance can be optimized, potential compliance issues identified and mitigated early in the design process, the number of physical prototypes required can be reduced, and the risk of test failures and recalls minimized



https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=cst

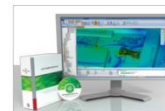
Полный набор решений для 3D электромагнитного моделирования для проектирования, анализа и оптимизации разнообразных электромагнитных компонентов и систем.

Коммерческий продукт.



**CST STUDIO SUITE
2017 Offers
EM Simulation on
Every Scale**

Computer Simulation Technology (CST)



Filter simulation reduces costs and design time, enabling users to analyze and improve the performance and compliance of components and systems from the earliest stages of design. CST STUDIO SUITE® 2017, the upcoming release of the EM and multiphysics simulation package, introduces new features that extend the software's range of applications. These features include both front-end and back-end improvements across the suite, with many focusing on tools for synthesizing and simulating components, as well as for managing and analyzing these components as systems.

FILTER DESIGNER 3D
Cross-coupled filters offer a compact and high-performance way to use the spectrum efficiently. However, the complex and sensitive nature of these filters makes them challenging to design with traditional methods. Filter Designer 3D can automatically synthesize cross-coupled and diplexer filter designs to meet the specifications, including transmission zeros, Q-factor and ripple. Filter Designer 3D can calculate the coupling matrix on which the filter engineer can base a design, or produce a full filter model that can be used as the basis of an optimization or system simulation using the full-wave 3D solvers of CST STUDIO SUITE. An example is shown in Figure 1.



ANTENNA-TO-ANTENNA COUPLING
System integrators and electromagnetic compatibility (EMC) engineers often need to know how antennas on a shared platform couple to each other. On smaller platforms, the CST Time Domain Solver and Integral Equation Solver are efficient options for antenna coupling simulation. CST STUDIO SUITE 2017 expands this capability to extremely large platforms as well, the new tracing Automatic Solver (A Solver) in CST STUDIO SUITE can now directly

CST STUDIO SUITE 2017 Offers EM Simulation on Every Scale. Microwave Journal, 2017, February

Другие известные коды – CST (Computer Simulation Technology)

Большая часть указанных выше программных продуктов имеет высокую стоимость, а в силу их сложности зачастую требуются значительные усилия для получения результатов моделирования требуемых конкретных приборов. Исследователи, использующие такие сложные пакеты программ, могут обходиться вообще без формулирования систем уравнений, описывающих физические процессы, которые они моделируют. Но при этом, к сожалению, можно получить нефизичные результаты.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 2017 год, том 29, номер 7, стр. 109-122

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В РЕЛЯТИВИСТСКОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ В СРЕДЕ CST PARTICLE STUDIO

© 2017 г. С.А. Куркин, А.А. Бадарин, А.А. Короновский, Н.С. Фролов, А.Е. Храмов*

В работе в среде CST Particle Studio построена и подробно описана модель интенсивного РЭП для изучения развития и взаимодействия в нём неустойчивостей. Проведены численное моделирование сложной динамики РЭП и анализ физических механизмов сосуществования, одновременного развития и взаимодействия бурсиановской и диокотронной неустойчивостей в ненейтральном РЭП в классической релятивистской модели виркатора. Обнаружена и исследована новая численная неустойчивость в электронном потоке, приводящая к появлению характерной “ряби” в пучке. Предложен метод борьбы с данной неустойчивостью. Т

Основные понятия валидации и верификации*

Модель. Представление физической системы или процесса, предназначенное для улучшения нашей способности понимать, прогнозировать или контролировать ее поведение.

Моделирование. Процесс построения или модификации модели.

Моделирование (симуляция). Развитие или использование модели.

Верификация. Процесс определения того, что реализация модели точно представляет концептуальное описание модели и ее решение разработчиком.

Валидация. Процесс определения степени, в которой модель является точным представлением реального мира с точки зрения предполагаемого использования модели.

Неопределенность. Потенциальный недостаток какой-либо фазы процесса моделирования из-за недостатка знаний.

Ошибка. Распознаваемый недостаток на любом этапе или в процессе моделирования, который не связан с недостатком знаний.

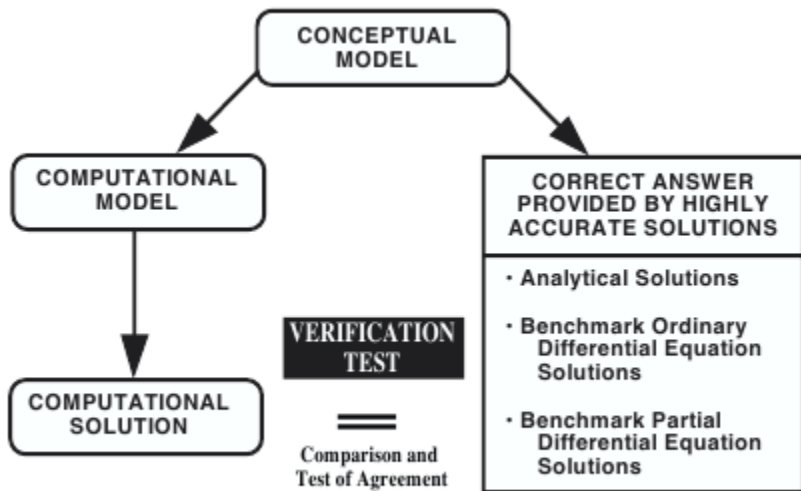
Прогнозирование. Использование модели для предсказания состояния физической системы в условиях, для которых модель не была проверена.

Калибровка. Процесс настройки параметров численного или физического моделирования в вычислительной модели с целью улучшения согласия с экспериментальными данными.

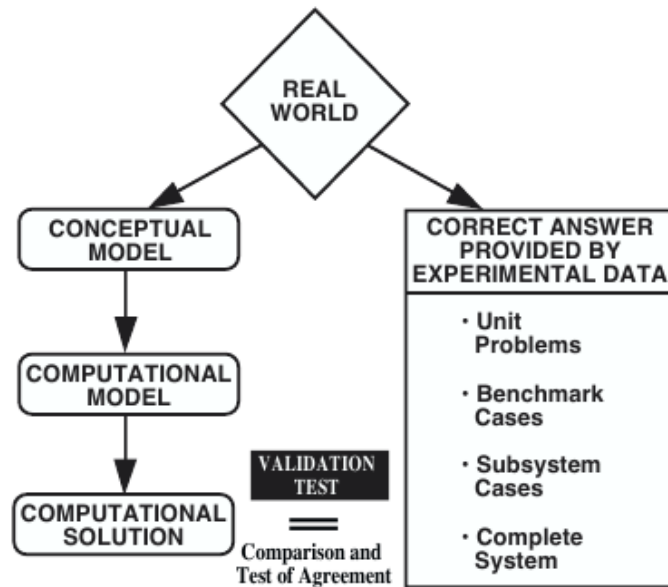
***Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-G-077-1998, Reston, VA, 1998.**

Валидация и верификация ПО

Процесс верификации:



Процесс валидации:



*Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-G-077-1998, Reston, VA, 1998.

Валидация и верификация ПО

Software verification asks the question, "Are we building the product right?"; that is, does the software conform to its specification.

«Правильно ли мы создаем продукт?»,
то есть соответствует ли программное
обеспечение своей спецификации.

Software validation asks the question, "Are we building the right product?"; that is, is the software doing what the user really requires.

«Мы создаем правильный продукт?»,
то есть делает ли программное
обеспечение то, что действительно
требуется пользователю.

IEEE Std 610.12-1990 - IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology ISO/IEC/IEEE 24765:2010(E),
Systems and software engineering – Vocabulary.

1012-2016 - IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation.

Валидация и верификация ПО

Modeling error's categories*:

- Project Management Errors;
- Data and Data Model Errors;
- Logic Model Errors;
- Experimentation Errors.

Source of errors**:

1. Selection of mesh spacing or time steps that are too large.
2. Selection of convergence criteria for iterative equation solution that are too loose.
3. Programming errors in the computer code.
4. Errors in the specification of input for the simulation of the experiment.
5. Errors in understanding of code output.

Категории ошибок моделирования:

- Ошибки управления проектом;
- Ошибки данных и модели данных;
- Ошибки логической модели;
- Ошибки экспериментов.

Источник ошибок:

1. Выбор слишком большого шага сетки или временных шагов.
2. Выбор слишком слабых критериев сходимости для решения итерационного уравнения.
3. Ошибки программирования в компьютерном коде.
4. Ошибки в спецификации входных данных для моделирования эксперимента.
5. Ошибки в понимании вывода кода.

*Carson J.S., II, "Model verification and validation", Proc. 2002 Winter Simulation Conf., pp.52-58, 2002.

**Mahaffy J. Verification and Validation of Codes and Results.

<http://www.personal.psu.edu/users/j/h/jhm/ME540/lectures/VandV/VandV.html>

Валидация и верификация ПО*

2-9 ARE THE RESULTS CORRECT? TESTS

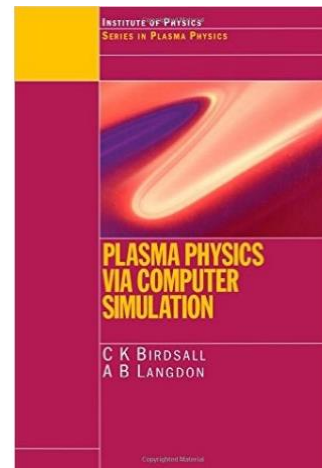
The simulator, in demonstrating correctness, has many of the problems of a theorist or experimenter. The latter two may be questioned, for example, on their approximations and on their instruments. The simulator uses an unpublished program, with a restricted set of physics (*e.g.* forced to be in one dimension, or to be electrostatic or lacking collisions, radiation, etc.), with carefully chosen initial conditions and a limited amount of output. How can he tell himself and the world that his work is to be believed?

He can compare his results with those obtained in theory and or in experiment, obtain the desired results for problems with known answers, show invariance of his results as the nonphysical computer parameters (Δt , Δx , NP, NG, etc.) are changed, and so on. Even so, he may leave some doubters. Problems that are fundamental may be checked by simulators at different computer centers, using separate programs; an example of such a problem is plasma diffusion across a magnetic field.

The simulator himself must have confidence in his program and know the bounds within which it should work. The confidence must be real. First, all component parts of the program (particle mover, field solver, etc.) must be tested separately to produce predictable results.

Сам автор программы должен быть уверен в ней и знать границы, в пределах которых она должна работать. И эта уверенность должна быть реальной, а все составные части программы (например, движение частиц, моделирование полей и т. д.) должны тестироваться отдельно для получения предсказуемых результатов.

*C.K. Birdsall, A.B Langdon. Plasma Physics via Computer Simulation. CRC Press, 2004
(Ч. Бэдсел, А. Лэнгдон. Физика плазмы и численное моделирование)

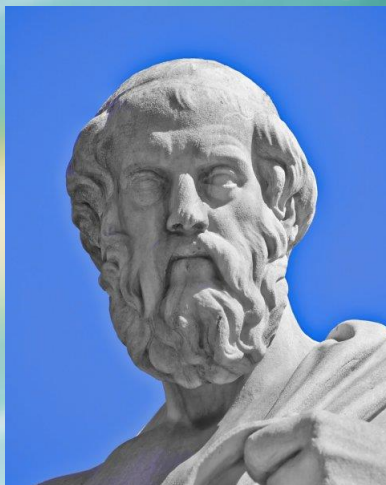


Основные публикации

1. B.W. Boehm. Software Engineering Economics, Prentice-Hall. 1981. 767 p.
2. F. G. Blottner. Accurate Navier-Stokes results for the hypersonic flow over a spherical nosetip. AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 27, No. 2 (1990), pp. 113-122.
3. AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamic Simulations, AIAA Report G0771988, 1998. 53 p.
4. W.L. Oberkampf, T. G. Trucano. Verification and validation in Computational Fluid Dynamics. Sandia National Laboratory Report SAND2002059, 2002. 122 p.
5. P.J.Roache. Verification and Validation in Computational Science and Engineering. Hermosa Publishers, 1998, 403412.
6. R.G.Sargent. Verification and validation of simulation models. Proc. 2011 Winter Simulation Conf. (Proc. IEEE), 83-198.
7. J.S.Carson II. Model verification and validation. Proc. 2002 Winter Simulation Conf. 2002. 52-58.
8. 1012-2016 - IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation. 2017. 216 p.
9. Ч. Бэдсел, А. Лэнгдон. Физика плазмы и численное моделирование. 1989. 452 с.
10. Р. Хокни, Дж. Иствуд. Численное моделирование методом частиц. 1987. 640 с.
11. А. А. Самарский. Теория разностных схем. 1989. 614 с.
12. С. К. Годунов. Уравнения математической физики. 1979. 391 с.
13. Б. Л.Рождественский, Н. Н. Яненко. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. 1978. 687 с.
14. Н. С. Бахвалов. Численные методы. 1975. 632 с.
15. Г. И. Марчук. Методы вычислительной математики. 1977. 456 с.
16. Н. Н. Калиткин. Численные методы. 1978. 52 с.
17. Ю. А. Березин, В. А. Вшивков. Метод частиц в динамике разреженной плазмы. 1980. 96 с.

<https://belnet.bsu.by/article/1462>

***Круглое невежество не самое
большое зло: накопление плохо
усвоенных знаний еще хуже.***



Платон