УДК 28.17.23:28.21:90.03.07

ОПТИМАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И ПРОЦЕССОВ

Б.М. Менин[a]

[a] независимый консультант по холодильному оборудованию, Беэр-Шева, 8464209, Израиль
Адрес для переписки: meninbm@gmail.com

Информация о статье
Поступила в редакцию 17.12.17, принята к печати 26.01.18
doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-322-330
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Менин Б.М. Оптимальная математическая модель для описания физических явлений и процессов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 322–330. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-322-330

Аннотация
Предмет исследования. Предложен подход, обеспечивающий численный расчет абсолютной погрешности измеряемой физической величины, способной количественно оценить минимально достижимое несоответствие разработанной модели исследуемому объекту. Вопрос о достижении разумного предела точности измерений в технике и науке остается открытым, несмотря на использование мощных компьютеров, учитывающих огромное количество переменных, и новейшие математические методы расчета. Поскольку в любой физико-математической модели содержится определенное количество информации об исследуемом объекте в зависимости от количественного и качественного набора выбранных физических переменных, то должно быть найдено оптимальное количество учтенных параметров. **Метод**. Принципы теории информации использованы для теоретического объяснения и обоснования экспериментальных результатов, которые определяют точность различных фундаментальных постоянных. Представлена методика выбора модели с оптимальным количеством учтенных физических величин и расчета минимально достижимого значения абсолютной и сравнительной погрешностей измеряемой физической величины. В качестве критерия оптимальности предлагается количество информации, содержащейся в модели. **Основные результаты**. В рамках информационного подхода показано, что совершенство устройств в физике и технике фундаментально ограничено. Предел точности измерений, рассчитанный по информационному методу, намного жестче, чем это предсказывается соотношением неопределенностей Гейзенберга. Предложенная метрика обеспечивает численный расчет абсолютной погрешности измеряемой величины, которая способна количественно оценить разницу между разработанной моделью и исследуемым объектом. Основные принципы теории измерений остаются в силе, и их можно применять отдельно на дальнейшей стадии конкретизации и компьютеризации модели. **Практическая значимость**. Применение концепции сравнительной погрешности снижает риск выбора завышенных показателей проектируемого оборудования, позволяет уменьшить сроки и стоимость его разработки. Использование методики расчета относительной погрешности согласно информационному методу позволит значительно снизить финансовые затраты по совершенствованию Международной системы единиц СИ.

Ключевые слова
математическое моделирование, предел точности измерений, теория информации, теория подобия, измерение фундаментальных постоянных

Благодарности
Автор выражает огромную признательность и глубокое уважение проф. А.А. Гухману и проф. Э.И. Гуйко (пусть благословенна будет о них память) за их многолетнюю душевную поддержку и высококвалифицированные советы, замечания при выработке концепции и детальной структуры информационного подхода, на разработку которого ушло в общей сложности 33 года.

OPTIMAL MATHEMATICAL MODEL FOR DESCRIPTION OF PHYSICAL PHENOMENA AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

B.M. Menin[a]

[a] Mechanical & Refrigeration Consultation Expert, Beer-Sheba, 8464209, Israel
Corresponding author: meninbm@gmail.com

Article info
Received 17.12.17, accepted 26.01.18
doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-322-330
Article in Russian

For citation: Menin B.M. Optimal mathematical model for description of physical phenomena and technological processes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 322–330 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-322-330

Abstract

Subject of Research. The paper presents an approach that provides a numerical calculation of the absolute uncertainty of the measured physical quantity, which is capable of quantitatively estimating the minimum achievable discrepancy between the developed model and the object under study. The question of achieving a reasonable limit of measurement accuracy in engineering and science remains open, despite the use of powerful computers that take into account a huge number of quantities, and the latest mathematical methods of calculation. Since any physical and mathematical model contains a certain amount of information about the object under research, depending on the quantitative and qualitative set of the selected physical quantities, the optimal number of the chosen quantities must be found. **Method**. The principles of information theory are used to provide *theoretical* explanation and justification for the experimental results that determine the accuracy of various fundamental constants. We present the method of choosing a model with the optimal number of quantities considered and calculating the minimum achievable absolute and comparative uncertainties of the measured variable. The amount of information contained in the model is proposed as the criterion of optimality. **Main Results**. Within the framework of the information approach, the results show that the perfection of devices in physics and engineering is fundamentally limited. The limit of measurement accuracy calculated by the information method is much more stringent than is predicted by the Heisenberg uncertainty relation. The proposed metric provides numerical calculation of the absolute uncertainty, which is capable of quantitatively estimating the difference between the developed model and the object under study. The basic principles of the theory of measurements remain in force, and they can be used separately in the further stage of the specification and computerization of the model. **Practical Relevance**. The application of comparative uncertainty concept reduces the risk of selecting overestimated indicators of the equipment being designed, gives the possibility to reduce the time and cost of its development. Methodology application for calculating the relative uncertainty according to the information method will reduce significantly the financial costs of improving the International system of SI units.

Keywords

mathematical modeling, measurement accuracy limit, information theory, similarity theory, fundamental constants measurement

Acknowledgements

The author expresses his deep gratitude and profound respect to Prof. A.A. Gukhman and Prof. E.I. Guigo (let their memory be blessed) for many years of their spiritual support and highly qualified advice, comments in developing the concept and detailed structure of the information approach, which took a total of 33 years to be developed.

Введение

Несмотря на многочисленные экспериментальные и компьютерные исследования в технике и науке, точность расчетов технических и физических параметров все еще неудовлетворительна, и существует необходимость разработать единый упрощенный метод для оценки точности модели исследуемого процесса.

Первой задачей исследователя, изучающего явление, как правило, является определение условий, при которых явление может неоднократно наблюдаться в лаборатории и может быть проверено и подтверждено. Чтобы получить точное значение физической величины, ее нужно измерить. Для реализации измерения всегда требуется конкретное устройство (это предполагает существование уже сформулированной физико-математической модели), посредством которого исследуемая физическая величина становится известна с некоторой степенью точности. В свою очередь, объем информации, полученной измерением, может быть рассчитан путем уменьшения неопределенности, возникающей в результате измерения. Другими словами, неопределенность в отношении конкретной ситуации представляет собой общий объем потенциальной информации в этой ситуации [1].

Мы представляем методику выбора модели с оптимальным количеством учтенных физических величин и расчета минимально достижимого значения абсолютной погрешности измеряемой физической величины. В качестве критерия оптимальности предлагается количество информации, содержащейся в модели. Безусловно, помимо априорной абсолютной погрешности, обусловленной конечностью модели, существуют апостериорные погрешности, связанные с внутренней структурой модели и ее последующей компьютеризацией: неточные вводные данные, неточные физические предположения, ограниченная точность решений интегро-дифференциальных уравнений и т.д.

Настоящий анализ предназначен помочь ученым и проектантам значительно сократить продолжительность исследований и проектирования, тем самым снизить стоимость проекта.

Основные предпосылки

Моделирование – это информационный процесс, в котором информация о состоянии и поведении наблюдаемого объекта получается из разработанной модели. Эта информация является основным предметом интереса в теории моделирования. Во время процесса моделирования информация увеличивается, а информационная энтропия уменьшается из-за увеличения знаний об объекте [2].

При изучении конкретного объекта исследователь во время мысленной формулировки физической модели (искажение не привносится в реальную систему) выбирает, согласно накопленным знаниям, интуиции и жизненному опыту, специфические физические величины, характеризующие исследуемый процесс по качественным и количественным аспектам. Выбор физических величин отнюдь не бесконечен. Он ограничен не только возможной продолжительностью и разрешенной стоимостью исследования. Основная и фундаментальная проблема процесса моделирования заключается в том, что по умолчанию сознательный наблюдатель обязан и вынужден выбирать параметры из обширного, но конечного набора физических величин, определенных в так называемой системе основных физических величин, такой как International System of Units (СИ). Переменные могут качественно и количественно отличаться от другой группы физических величин, выбранных другой группой ученых. Это случилось, например, при исследовании электрона в виде частицы или волны. Вот почему СИ можно охарактеризовать наличием равновероятного учета любой переменной с точки зрения исследователя. В СИ имеется семь основных физических величин, $\xi=7$: L – длина, M – вес, T – время, I – электрический ток, Θ – термодинамическая температура, J – сила света, F – количество вещества [3].

СИ – это фантазия, созданная коллективным воображением, и не существует в физической реальности. Вместе с тем без СИ моделирование явления невозможно. Можно интерпретировать СИ как основу всех доступных знаний, которые люди имеют об окружающей природе на данный момент. Эта система включает основные и производные физические величины, используемые для описания различных систем. Например, в механике СИ используется базис {L – длина, M – масса, T – время}, т.е. $\text{система}_{\text{СИ}} \equiv LMT$.

Известно [3, 4], что размерность любой производной физической величины может быть выражена как уникальная функция произведения основных физических величин с определенными показателями степени l, m ..., f, которые могут принимать только целочисленные значения, и изменяются в конкретных диапазонах:

$$\boldsymbol{q} \ni L^l \cdot M^m \cdot T^t \cdot I^i \cdot \Theta^{\Theta} \cdot J^j \cdot F^f \;; \tag{1}$$

$$-3 \le l \le +3,\ -1 \le m \le +1,\ -4 \le t \le +4,\ -2 \le i \le +2,\ -4 \le \Theta \le +4,\ -1 \le j \le +1,\ -1 \le f \le +1\,; \tag{2}$$

$$e_l = 7;\, e_m = 3;\, e_t = 9;\, e_i = 5;\, e_\Theta = 9;\, e_j = 3;\, e_f = 3\,, \tag{3}$$

где $\boldsymbol{e}_l$, …, $\boldsymbol{e}_f$ – число вариантов размерности для каждой основной физической величины, рассчитываемое согласно (2). Например, l^{-3} используется в формуле плотности, Θ^4 используется в законе Стефана–Больцмана.

Общее число размерных физических величин Ψ' СИ рассчитывается согласно (3) и равно

$$\Psi' = \prod_l^f e_i - 1 = e_l \cdot e_m \cdot e_t \cdot e_i \cdot e_\Theta \cdot e_j \cdot e_f - 1 = 7 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 3 - 1 = 76544, \tag{4}$$

где «–1» соответствует случаю, когда все показатели степени основных физических величин в формуле (1) рассматриваются в нулевой размерности, $\prod$ – произведение числа вариантов размерностей e_l,…, e_f.

Значение Ψ' (4) включает как прямые, так и обратные физические величины, например, L^1 – длина, L^{-1} – прогонная длина. Объект можно изучать, зная только одну из его симметричных частей, в то время как другие, структурно дублирующие эту часть, могут рассматриваться как информационно пустые. Поэтому число вариантов размерностей может быть уменьшено в 2 раза. Это означает, что общее число вариантов размерностей физических величин без обратных величин равно

$$\Psi = \Psi'/2 = 38272\,. \tag{5}$$

СИ – это абелева конечная группа, имеющая естественную структуру модуля над кольцом целых чисел [5]. В связи с этим показатели основных физических величин в формуле (1) для СИ принимают только целочисленные значения. Только благодаря этому факту и с учетом (5) и π-теоремы [4] можно вычислить общее число возможных безразмерных критериев $\mu_{\text{СИ}}$ для СИ с $\xi = 7$ основными физическими величинами:

$$\mu_{\text{СИ}} = \Psi - \xi = 38272 - 7 = 38265\,, \tag{6}$$

где $\mu_{\text{СИ}}$ соответствует максимальному количеству информации, содержащейся в системе основных физических величин СИ. Поскольку система СИ представляет собой абелеву конечную группу, число $\mu_{\text{СИ}}$ называется порядком группы. Каждая физическая величина позволяет исследователю получить определенный объем информации об исследуемом объекте. Основные определения и оценка объема информации, использованной в эксперименте, были четко сформулированы Л. Бриллюэном [6].

Согласно вышеизложенному, можно рассматривать выбор физической величины как случайный процесс, и учет конкретной физической величины будет равновероятным. Этот подход полностью игнорирует человеческую оценку информации. Другими словами, набор из 100 нот, воспроизводимых гориллой, и мелодия из 100 нот балета Чайковского «Лебединое озеро» имеют равный объем информации.

Предположим, что имеется $\mu_{\text{СИ}}$ физических величин, так что существует неопределенность, непосредственно связанная с $\mu_{\text{СИ}}$. Другими словами, чем больше значение $\mu_{\text{СИ}}$, тем больше неопределенность. Ее измеренное числовое значение называется энтропией и может быть рассчитано по формуле

$$H = k_B \cdot \ln\mu_{СИ}\ , \qquad (7)$$

где k_B – постоянная Больцмана.

Когда исследователь выбирает влияющие факторы (сознательное ограничение числа физических величин, описывающих исследуемый процесс), энтропия математической модели изменяется априори. Естественно измерить изменение энтропии по параметру

$$\Delta H = H_{\text{pr}} - H_{\text{ps}}\ , \qquad (8)$$

где ΔH – разность энтропии между двумя случаями, pr – «априори», ps – «апостериори».

Если учесть, что эффективность пассивного ментального метода Q [6] равна единице, потому что проводится только мысленный эксперимент и никакие искажения не привносятся в реальную систему (исследователь только мыслит и рассуждает), то можно написать согласно (8):

$$\Delta A = \text{Q}\cdot\Delta H = H_{\text{pr}} - H_{\text{ps}}\ , \qquad (9)$$

где ΔA – априорная информация о материальном объекте.

Используя уравнения (7)–(9) и символы z' – число физических величин в выбранной системе$_{СИ}$, β' – число основных физических величин в выбранной системе$_{СИ}$, получаем соотношение

$$\Delta A' = \text{Q}\cdot\left(H'_{\text{pr}} - H'_{\text{ps}}\right) = 1\cdot[k_B\cdot\ln\mu_{СИ} - k_B\cdot\ \ln(z'-\beta')] = k_B\cdot\ln[\mu_{СИ}/(z'-\beta')], \qquad (10)$$

где $\Delta A'$ представляет собой априорное количество информации о наблюдаемом объекте из-за выбора специфической системы$_{СИ}$.

Значение $\Delta A'$ связано с априорной погрешностью физико-математической модели, обусловленной только выбором системы$_{СИ}$, $\Delta_{\text{фмм}}'$ и S (безразмерный интервал наблюдения основной исследуемой величины u), следующей зависимостью [6]:

$$\Delta_{\text{фмм}}' = S\cdot\exp\left(-\Delta A'/k_B\right)\ . \qquad (11)$$

Подставляя (10) в (11), получаем

$$\Delta_{\text{фмм}}' = S\cdot(z'-\beta')/\mu_{СИ}. \qquad (12)$$

Следуя тем же рассуждениям, можно рассчитать априорную погрешность модели $\Delta_{\text{фмм}}''$, обусловленную только количеством безразмерных величин в модели:

$$\Delta_{\text{фмм}}'' = S\cdot(z''-\beta'')/(z'-\beta')\ , \qquad (13)$$

где z'' – число физических величин, учтенных в математической модели, β'' – число основных физических величин, записанных в модели.

Суммируя $\Delta_{\text{фмм}}'$ (12) и $\Delta_{\text{фмм}}''$ (13), можно оценить значение общей минимально достижимой абсолютной погрешности $\Delta_{\text{фмм}}$ при определении безразмерной исследуемой основной величины, которая «внедрена» в физико-математическую модель и вызвана только ее размерностью, конечным числом учитываемых величин:

$$\Delta_{\text{фмм}} = \Delta_{\text{фмм}}' + \Delta_{\text{фмм}}''.$$

Все вышесказанное можно суммировать в виде $\mu_{СИ}$-гипотезы: пусть в процессе формулирования модели выбирается система основных физических величин с общим числом размерных физических величин Ψ, ξ которых имеют независимую размерность. В рамках выбранной системы (z' – общее число размерных физических величин, β' – число основных физических величин) существует безразмерная основная величина u, меняющаяся в заданном диапазоне значений S. Тогда абсолютная погрешность $\Delta_{\text{фмм}}$ вычисления u (для заданного числа физических размерных величин z'', записанных в модели, из которых β'' – число выбранных основных физических величин), можно определить из следующего соотношения:

$$\Delta_{\text{фмм}} = S\cdot[(z'-\beta')/(\Psi-\xi) + (z''-\beta'')/(z'-\beta')]\ , \qquad (14)$$

где $\varepsilon = \Delta_{\text{фмм}}/S$ – сравнительная погрешность, $\mu_{СИ} = \Psi - \xi$ – общее число возможных безразмерных критериев для СИ с $\xi = 7$ основными физическими величинами.

Уравнение (14), что удивительно, оказывается очень простым. Абсолютная и относительная погрешности знакомы физикам. Что касается сравнительной погрешности, то она редко упоминается. Тем не менее, сравнительная погрешность имеет большое значение для применения теории информации в физике и инженерных науках [6].

Общая абсолютная погрешность модели, включая неточные входные данные, физические предположения, приближенное решение интегрально-дифференциальных уравнений и т.д., будет больше, чем $\Delta_{\text{фмм}}$. Таким образом, $\Delta_{\text{фмм}}$ является первичным и наименьшим компонентом возможного несоответствия реального объекта и результатов моделирования.

На самом деле уравнение (14) можно рассматривать как принцип неопределенности для процесса разработки модели. А именно, любое изменение уровня подробного описания наблюдаемого объекта (z'–β''; z'–β') обусловливает изменение величины минимальной абсолютной погрешности определения основной величины $\Delta_{\text{фмм}}$, характеризующей внутреннюю структуру объекта. Таким образом, оказывается, что размытость (неточное представление) объекта в глазах исследователя зависит как от выбранной системы, так и от количества физических величин, принятых во внимание сознательным наблюдателем. Последнее напрямую зависит от знаний, накопленного жизненного опыта и интуиции исследователя. Объективно эти факторы допускают уже заявленную выше возможность рассмотрения выбора физической величины как случайного процесса с равновероятным учетом конкретной переменной.

$\mu_{СИ}$-гипотеза имеет физический смысл. Она свидетельствует о том, что в природе существует фундаментальный предел точности измерения любого процесса, который нельзя превзойти каким-либо усовершенствованием инструментов, методов измерения и компьютеризации модели. Величина этого предела намного выше, чем отношение неопределенностей Гейзенберга.

Представленный информационный подход уже применялся для различных отраслей техники, включая процессы замораживания пищевых продуктов, производство жидкого льда, системы накопления холода, при построении моделей климата, расчете нагрева обшивки космического аппарата. Мы приводим несколько примеров, чтобы убедить читателей, что предлагаемая метрика универсальна, а удивительные результаты не являются случайными и заслуживают доверия.

Измерение фундаментальных физических постоянных

Мы проанализировали несколько исследовательских публикаций и рекомендации CODATA (Комитет по данным для науки и техники) за 2008–2014 гг. с позиции достигнутых значений относительной и сравнительной погрешностей при измерении постоянной Ридберга R_∞. Ни в одом из текущих экспериментов по вычислению значения R_∞ не был заявлен предполагаемый интервал, в котором может быть установлено ее истинное значение. По этой причине, чтобы применить наш заявленный подход, в качестве возможного интервала измерения R_∞ мы выбираем разность ее значений, полученных в двух проектах: $(R_\infty)_{мин}=\mathbf{1{,}0973731568}076(96)\cdot 10^7$ м$^{-1}$ [7] и $(R_\infty)_{макс}=\mathbf{1{,}097373156854}(10)\cdot 10^7$ м$^{-1}$ [8].

Тогда возможный наблюдаемый диапазон S_R* изменений R_∞ и усредненное значение $(R_\infty)_{сред}$ равны

$$S_R{*}=(R_\infty)_{макс}-(R_\infty)_{мин}=\mathbf{1{,}097373156854}(10)\cdot 10^7-\mathbf{1{,}0973731568}076(96)\cdot 10^7=46{,}4\cdot 10^{-5}\ (\text{м}^{-1})\,; \quad (15)$$

$$(R_\infty)_{сред}=((R_\infty)_{макс}+(R_\infty)_{мин})/2=(\mathbf{1{,}097373156854}(10)\cdot 10^7+\mathbf{1{,}0973731568}076(96)\cdot 10^7)/2=$$
$$=\mathbf{1{,}0973731568}309\cdot 10^7(\text{м}^{-1}). \quad (16)$$

Анализ данных, приведенных в [7–11], показывает (табл. 1), что в течение последних 10 лет не было резкого повышения точности измерения R_∞ с точки зрения уменьшения относительной и сравнительной погрешностей. Кроме того, ее достоверное и точное значение на данный момент неизвестно. В связи с этим ученые CODATA рассчитывают и объявляют каждые 2 года рекомендуемое значение относительной погрешности, благодаря которой в будущем будет возможно достичь истинного целевого значения постоянной Ридберга R_∞.

Год	Постоянная Ридберга, м$^{-1}$	Достигнутая относительная погрешность	Достигнутая абсолютная погрешность, м$^{-1}$	Интервал изменений R_∞, м$^{-1}$	Рассчитанная сравнительная погрешность	Ссылки
	$R_\infty\cdot 10^{-07}$	$r_R\cdot 10^{12}$	$\Delta_R\cdot 10^{-05}$	$S_R\cdot 10^{-05}$	Δ_R / S_R	
2008	**1,0973731568**527(73)	6,6	7,242662835	46,4	0,1561	[9]
2009	**1,097373156854**(10)	10	10,97373157		0,2365	[8]
2012	**1,0973731568**539(55)	5,0	5,486865784		0,1183	[10]
2014	**1,0973731568**508(65)	5,9	6,474501625		0,1395	[11]
2017	**1,0973731568**076(96)	нет данных				[7]

Таблица 1. Постоянная Ридберга и ее относительная и сравнительная погрешности измерений

Применяя информационно-ориентированный подход, мы можем рассчитать желаемое значение относительной погрешности $(r_{\min})_{LMT\Theta I}$, при которой исследователи в будущем предполагают измерить истинное значение R_∞. Измерительная аппаратура, испытательный стенд и модель измерения R_∞ соответствуют системе$_{СИ}\equiv LMT\Theta I$. Для этой цели мы должны найти оптимальное число физических величин, соответствующее минимально достижимой сравнительной погрешности. Мы приравниваем частную производную от ε (14) по $z'-\beta'$ к нулю, т.е.

$$(\Delta_{фмм}/S)'_{z'-\beta'}=[(z'-\beta')/\mu_{СИ}+(z''-\beta'')/(z'-\beta')]'=[1/\mu_{СИ}-(z''-\beta'')/(z'-\beta')^2],$$

$$[1/\mu_{СИ}-(z''-\beta'')/(z'-\beta')^2]=0,$$

$$[(z'-\beta')^2/\mu_{СИ}=(z''-\beta''). \quad (17)$$

Таким образом, величину $(\varepsilon_{мин})_{LMT\Theta I}$ можно найти, используя (3), (6), (17) и следующие данные:

$$(z'-\beta')=\left(e_l\cdot e_m\cdot e_t\cdot e_\Theta\cdot e_I-1\right)/2-5=\left(7\cdot 3\cdot 9\cdot 9\cdot 5-1\right)/2-5=4247, \quad (18)$$

$$(z''-\beta'')=(z'-\beta')^2/\mu_{СИ}=4247^2/38265\approx 471\,, \quad (19)$$

где «–1» соответствует случаю, когда все показатели основных физических величин в уравнении (1) равны 0; деление на 2 обусловлено наличием в системе прямых и обратных физических величин, например, L^1 – длина, L^{-1} – прогонная длина. Как уже отмечалось, об объекте можно судить, зная только одну из его симметричных частей, в то время как другие, структурно дублирующие эту часть, можно рассматривать как информационно пустые. Таким образом, количество вариантов размерностей может быть уменьшено в 2 раза; β'=5 соответствует количеству основных физических величин: L, M, T, Θ, I.

Подставляя (6), (18) и (19) в (14), находим

$$(\varepsilon_{R\text{мин}})_{LMT\Theta I} = \Delta_{\text{фмм}} / S = 0,2219. \qquad (20)$$

Принимая во внимание (15) и (20), рассчитываем наименьшую возможную абсолютную погрешность $(\Delta_{R\text{мин}})_{LMT\Theta I}$ для системы$_{\text{СИ}} \equiv LMT\Theta I$:

$$(\Delta_{R\text{мин}})_{LMT\Theta I} = (\varepsilon_{R\text{мин}})_{LMT\Theta I} \cdot S_R{}^* = 0,2219 \cdot 46,4 \cdot 10^{-5} = 0,103 \cdot 10^{-5}\ (\text{м}^{-1}). \qquad (21)$$

В этом случае наименьшая возможная относительная погрешность $(r_{R\text{мин}})_{LMT\Theta I}$ для системы$_{\text{СИ}} \equiv LMT\Theta I$, с учетом (16) и (21), выглядит следующим образом:

$$(r_{R\text{мин}})_{LMT\Theta I} = (\Delta_{R\text{мин}})_{LMT\Theta I} / \left(\left(R_{\infty\text{макс}} + R_{\infty\text{мин}}\right)/2\right) \approx 9,4 \cdot 10^{-12}. \qquad (22)$$

Обращаем внимание читателей на тот факт, что значение постоянной Ридберга [11] $5,9 \cdot 10^{-12}$ занижено по сравнению с значением, вычисленным согласно предложенному методу (22). Вопрос надежности является ключевым, так как уточнение значений фундаментальных констант новаторскими методами крайне уязвимо [12]. Например, разброс данных, хотя и не отражался в увеличении неопределенности, имел место с константой Ридберга [12]. Другими словами, происходит явное ухудшение ситуации в случае, когда результат важен сам по себе. Однако для подавляющего большинства входных данных точность определяется не статистическими, а систематическими неопределенностями, оценка которых часто является самой нетривиальной частью эксперимента или расчета. В этом случае отсутствие накопленного опыта в исследованиях первопроходцев играет решающую роль, хотя специалисты обладают высокой квалификацией и используют новейшие технологии. Таким образом, развивается парадоксальная ситуация, в которой чем больше несоответствий, тем лучше: уязвимости в новых измерительных и вычислительных технологиях становятся более понятными [12]. Вот почему новый информационный подход может играть позитивную роль в ожидании принятия новых определений единиц Международной системы СИ.

Фундаментальная постоянная	Обозначение	Размерность	Система СИ	Анализируемый интервал публикаций	Опубликованная, рекомендуемая относительная погрешность	Рассчитанная относительная погрешность
Гравитационная постоянная	G	$\text{м}^3\ \text{кг}^{-1}\ \text{с}^{-2}$	$LMTI$	2000–2016	$1,4 \cdot 10^{-5}$ [9]	$1,35 \cdot 10^{-5}$
					$4,7 \cdot 10^{-5}$ [11]	
Постоянная Планка	h	$\text{м}^2\ \text{кг}\ \text{с}^{-2}$	$LMTI$	2007–2014	$1,2 \cdot 10^{-8}$ [11]	$8,7 \cdot 10^{-9}$
Постоянная Больцмана	k_B	$\text{м}^2\ \text{кг}\ \text{с}^{-2}\ \text{К}^{-1}$	$LMT\Theta$	2007–2015	$5,7 \cdot 10^{-7}$ [11]	$4,8 \cdot 10^{-7}$
Постоянная тонкой структуры	α		LMT	2006–2014	$2,9 \cdot 10^{-11}$ [14]	$2,9 \cdot 10^{-11}$
					$2,3 \cdot 10^{-10}$ [11]	
Постоянная Ридберга	R_∞	м^{-1}	$LMT\Theta I$	2008–2014	$5,9 \cdot 10^{-12}$ [11]	$9,4 \cdot 10^{-12}$
Число Авогадро	N_A	моль^{-1}	$LMTF$	2001–2015	$2 \cdot 10^{-8}$ [15]	$1,9 \cdot 10^{-8}$

Таблица 2. Фундаментальные физические постоянные: рекомендуемые и рассчитанные относительные погрешности

Вместе с тем следует отметить принципиальную разницу излагаемого метода по сравнению с методикой CODATA при определении рекомендуемой величины относительной погрешности той или иной фундаментальной физической постоянной. Согласно этой методике, подробное обсуждение входных данных, а также обоснование и построение таблиц значений, достаточных для прямого использования относительной погрешности, проводятся с привлечением современных, наиболее продвинутых статистических методов и мощных компьютеров. Это, в свою очередь, по мнению ученых CODATA, позволяет проверить самосогласованность входных данных и выходного набора значений. Однако на каждом этапе обработки данных проводится также экспертиза, основанная на интуиции, накопленных знаниях и жизненном опыте ученых. В рамках же излагаемого подхода реализуется теоретико-информационное обоснование расчета абсолютной и относительной погрешностей, причем на детальное описание всех данных и используемых процедур обработки не требуется значительное время. Фактически, $\mu_{СИ}$-гипотеза – это Черный лебедь [13] среди существующих теорий, связанных с проверкой несоответствия между моделью и наблюдаемым объектом, поскольку ни один из существующих статистических методов валидации и верификации построенной модели не учитывает наименьшую, первозданную абсолютную погрешность модели, обусловленную выбором системы и количеством учтенных физических величин в модели.

Аналогичные процедуры мы провели для анализа результатов измерений гравитационной постоянной, постоянной Планка, постоянной Больцмана, постоянной тонкой структуры и числа Авогадро. Данные сведены в табл. 2. Возможными причинами расхождения опубликованных и расчетных значений относительной погрешности могут быть, с одной стороны, недостаточный объем учтенных научных результатов, а с другой – необходимость совершенствования испытательных экспериментальных стендов. Первая причина будет восполнена автором в дальнейшей работе. Что касается второй причины, то здесь надо надеяться на лучшее – на продолжение финансирования экспериментальных работ, а идеи по улучшению методик измерения никогда не иссякают.

Заключение

Предлагаемый информационный подход имеет физический смысл. Любой физический процесс, от квантовой механики до сердцебиения, может фиксироваться наблюдателем только через своеобразную «линзу». Ее материал – это сплав не только математических уравнений, но и, независимо от желания исследователя, его интуиции, опыта и знаний. Они, в свою очередь, обрамлены системой основных физических величин, которая также выбирается универсальным соглашением людей. Таким образом, аберрация в моделировании, другими словами, искажение реальности, имеет место прежде формулирования любого физического, а тем более математического утверждения. Степень искажения изображения по сравнению с истинным реальным процессом зависит именно от выбранной $системы_{СИ}$ и от числа рассматриваемых физических величин. Таким образом, уже нельзя предполагать, что точность модели любого физического явления может быть доведена до границ, определяемых соотношением неопределенности Гейзенберга. Существует только первоначально известная абсолютная погрешность модели, определяемая μ-гипотезой и зависящая от $системы_{СИ}$ и количества физических величин, выбранных по волевому желанию исследователя.

Качество научной гипотезы следует оценивать не только по ее соответствию эмпирическим данным, но и по ее предсказаниям. В этой статье мы используем теорию информации, чтобы дать теоретическое объяснение и обоснование экспериментальных результатов, которые определяют точность различных фундаментальных констант. Фокус на реальном – это то, что позволило информационному методу определить новые применения в различных физических теориях и технологиях. Представленный подход способен ответить на один фундаментальный вопрос: «Как мы видим?», – потому что он основан на самом базисном кирпичике восприятия мироздания, которым является система основных физических величин. Информационный подход позволяет составить значимую картину будущих результатов, поскольку он основан на реалиях настоящего. В этом смысле, применяя результаты точных исследований к ограничениям, существующим в современной физике, необходимо четко понимать ее рамочную структуру и способ, с помощью которых исходные данные могут быть изменены [12]. Такое утверждение можно рассматривать как дополнительную причину для быстрой реализации $\mu_{СИ}$-гипотезы, концепции системы основных физических величин и, в целом, информационного подхода для анализа существующих экспериментальных данных об измерении фундаментальных физических констант.

Последствия наших выводов переносятся на все модели в физике и технике, в которых вышеприведенный предел, обусловленный конечным числом учтенных физических величин, оказывается скрытым, в том числе климатические, тепло- и массопереносные, теоретические и экспериментальные физические системы, где всегда требуется компромисс между сложностью модели и достижимой точностью. С другой стороны, предлагаемый метод не претендует на универсальность, поскольку, несмотря на кажущуюся привлекательность, существуют определенные ограничения, когда его применимость вызывает сомнения. Они включают следующее:

- метод не дает никаких рекомендаций по выбору конкретных физических величин для лучшего представления мира, но только ограничивает их количество. Информационно-ориентированный подход к оценке неопределенности модели не предполагает какой-либо пространственно-временной или причинно-следственной связи между задействованными физическими величинами или чем-то еще, учитывая только разницу между их количеством;
- информационно-ориентированный подход требует равновероятного появления физических величин, выбранных сознательным наблюдателем. Он игнорирует такие факторы, как знания разработчика, интуиция и жизненный опыт (личные философские наклонности [16]);
- подход требует знания или декларации интервала изменений основной наблюдаемой или исследуемой физической величины. На самом деле значение этого параметра не заявляется ни в каких серьезных экспериментальных исследованиях в физике и технике. Иногда интервал изменений, например,

констанциты Планка, скорости света и других фундаментальных физических констант, упоминается в обзорных статьях только для того, чтобы подтвердить сходимость экспериментальных данных до определенного значения или уменьшить разброс результатов.

Однако в рамках вышеизложенной концепции мы можем твердо утверждать, что на более базовом уровне наши результаты показывают, что совершенство устройств в физике и технике фундаментально ограничено. Это находится в противоречии с общемировыми взглядами. Точность измерений не может быть улучшена до сколь угодно большой степени. Предел точности, рассчитанный по информационному методу, намного жестче, чем это предсказывается соотношением неопределенностей Гейзенберга, и он накладывает серьезные ограничения в микро- и макрофизике. Таким образом, это исследование, которое звучит слишком хорошо, чтобы быть правдой, на самом деле оказалось настоящим прорывом.

Мы считаем, что теперь можно разрабатывать оптимальные модели, в которых используются размерные физические величины и безразмерные комплексы в рамках выбранной системы основных физических величин в соответствии с физическими критериями для инженерных задач, а также теоретической и экспериментальной физики. Применение концепции сравнительной погрешности снижает риск выбора завышенных показателей проектируемого оборудования. Это связано с тем, что конструкторы увеличивают, например, установленную мощность, размеры, скорость, требуемую накопленную энергию и т.д., более чем на 20–40% из-за опасений, что расчетные модели не соответствуют фактическим условиям. Это, в свою очередь, может привести к судебным искам со стороны клиентов. Кроме того, использование методики расчета относительной погрешности согласно информационному методу позволит значительно снизить финансовые затраты по совершенствованию Международной системы единиц СИ.

Теория измерений и ее концепции остаются правильной наукой сегодня, в XXI веке, и будут оставаться верными навсегда (парафраз проф. Л.Б. Окуня [17]). Использование $\mu_{\text{СИ}}$-гипотезы лишь ограничивает область применимости теории измерений для погрешностей, превышающих погрешность физико-математической модели, обусловленную ее конечностью. Основные принципы теории измерений остаются в силе, и их можно применять отдельно на дальнейшей стадии конкретизации и компьютеризации модели.

Наконец, поскольку значения сравнительных погрешностей и требуемое количество выбранных физических величин полностью независимы и различны для каждой системы, изложенный подход теперь может в принципе стать специфической метрикой при сравнении разных моделей, описывающих один и тот же исследуемый объект. Предложенная метрика обеспечивает численный расчет погрешности, которая способна количественно оценить разницу между разработанной моделью и исследуемым объектом. Расчеты проводятся очень просто, и результаты легко интерпретируются.

Таким образом, информационный подход радикально меняет наше понимание процесса моделирования. Оказывается, к радости или печали, мы видим мир вокруг нас, кроме любви и дружбы, в тумане сомнений и ошибок.

Литература

1. Voskoglou M.G. Fuzzy logic and uncertainty in mathematics education // International Journal of Applications of Fuzzy Sets. 2011. V. 1. P. 45–64.
2. Kunes J. Similarity and Modelling in Science and Technology. Springer, 2012. 442 p.
3. NIST Special Publication 330. The International System of Units (SI). 2008. 77 p.
4. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
5. Menin B. Information measure approach for calculating model uncertainty of physical phenomena // American Journal of Computational and Applied Mathematics. 2017. V. 7. N 1. P. 11–24. doi: 10.5923/j.ajcam.20170701.02
6. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М.: ГИФМЛ, 1960. 392 с.
7. Beyer A., Maisenbacher L., Matveev A. et al. The Rydberg constant and proton size from atomic hydrogen // Science. 2017. V. 358. N 6359. P. 79–85. doi: 10.1126/science.aah6677
8. Biraben F. Spectroscopy of atomic hydrogen. How is the Rydberg constant determined? // European Physical Journal Special Topics. 2009. V. 172. N 1. P. 109–119. doi: 10.1140/epjst/e2009-01045-3
9. Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006 // Reviews of Modern Physics. 2008. V. 80. N 2. P. 633–730. doi: 10.1103/RevModPhys.80.633
10. Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010 // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2012. V. 41. N 4. doi:

References

1. Voskoglou M.G. Fuzzy logic and uncertainty in mathematics education. *International Journal of Applications of Fuzzy Sets*, 2011, vol. 1, pp. 45–64.
2. Kunes J. *Similarity and Modelling in Science and Technology*. Springer, 2012, 442 p.
3. *NIST Special Publication 330. The International System of Units (SI)*. 2008, 77 p.
4. Guhman A.A. *Introduction to the Theory of Similarity*. Moscow, Vyshaya Shkola Publ., 1973, 296 p. (In Russian)
5. Menin B. Information measure approach for calculating model uncertainty of physical phenomena. *American Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 11–24. doi: 10.5923/j.ajcam.20170701.02
6. Brillouin L. *Science and Information Theory*. NY, Academic Press, 1956.
7. Beyer A., Maisenbacher L., Matveev A. et al. The Rydberg constant and proton size from atomic hydrogen. *Science*, 2017, vol. 358, no. 6359, pp. 79–85. doi: 10.1126/science.aah6677
8. Biraben F. Spectroscopy of atomic hydrogen. How is the Rydberg constant determined? *European Physical Journal Special Topics*, 2009, vol. 172, no. 1, pp. 109–119. doi: 10.1140/epjst/e2009-01045-3
9. Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006. *Reviews of Modern Physics*, 2008, vol. 80, no. 2, pp. 633–730. doi: 10.1103/RevModPhys.80.633
10. Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2012, vol. 41, no. 4.

10.1063/1.4724320
11. Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B. The 2014 CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014 // Reviews of Modern Physics. 2016. V. 88. N 3. doi: 10.1103/RevModPhys.88.035009
12. Karshenboim S.G. Progress in the accuracy of the fundamental physical constants: 2010 CODATA recommended values // Physics-Uspekhi. 2013. V. 56. N 9. P. 883–909. doi: 10.3367/UFNe.0183.201309d.0935
13. Taleb N.N. The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable. NY: Random House, 2007. 182 p.
14. Kirakosyan G.S. The correlation of the fine structure constant with the redistribution of intensities in interference of the circularly polarized Compton’s wave // PACS numbers: 12.10.-g, 12.20.Ds, 11.15.Kc. 2010. 7 p.
15. Azuma Y., Barat P., Bartl G. et al. Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si-enriched crystal // Metrologia. 2015. V. 52. N 2. P. 360–375. doi: 10.1088/0026-1394/52/2/360
16. Dodson B. So you think YOU'RE confused about quantum mechanics? 2013. Режим доступа: https://newatlas.com/confusion-basic-nature-quantum-mechanics/26216/ (дата обращения: 06.02.18).
17. Окунь Л.Б. Теория относительности и теорема Пифагора // УФН. 2008. Т. 178. № 6. С. 653–663.

doi: 10.1063/1.4724320
11. Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B. The 2014 CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. *Reviews of Modern Physics*, 2016, vol. 88, no. 3. doi: 10.1103/RevModPhys.88.035009
12. Karshenboim S.G. Progress in the accuracy of the fundamental physical constants: 2010 CODATA recommended values. *Physics-Uspekhi*, 2013, vol. 56, no. 9, pp. 883–909. doi: 10.3367/UFNe.0183.201309d.0935
13. Taleb N.N. *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. NY, Random House, 2007, 182 p.
14. Kirakosyan G.S. The correlation of the fine structure constant with the redistribution of intensities in interference of the circularly polarized Compton’s wave. *PACS numbers: 12.10.-g, 12.20.Ds, 11.15.Kc*, 2010, 7 p.
15. Azuma Y., Barat P., Bartl G. et al. Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si-enriched crystal. *Metrologia*, 2015, vol. 52, no. 2, pp. 360–375. doi: 10.1088/0026-1394/52/2/360
16. Dodson B. So you think YOU'RE confused about quantum mechanics? 2013. Available at: https://newatlas.com/confusion-basic-nature-quantum-mechanics/26216/ (accessed: 06.02.18).
17. Okun L.B. The theory of relativity and the Pythagorean theorem. *Physics-Uspekhi*, 2008, vol. 51, no. 6, pp. 622–631. doi: 10.1070/PU2008v051n06ABEH006552

Автор

Менин Борис Михайлович – кандидат технических наук, руководитель, независимый консультант по холодильному оборудованию, Беэр-Шева, 8464209, Израиль, ORCID ID: 0000-0002-8298-5944, meninbm@gmail.com

Author

Boris M. Menin – PhD, manager, Mechanical & Refrigeration Consultation Expert, Beer-Sheba 8464209, Israel, ORCID ID: 0000-0002-8298-5944, meninbm@gmail.com