

# СОГЛАСОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Л.В. Галсанова

Научный руководитель – Л.И. Худоногова

Томский политехнический университет

lv3@tpu.ru

## Введение

Для получения количественной оценки тех или иных физических явлений, помимо закономерностей, описывающих эти явления, необходимо также обладать информацией о численных значениях физических величин. Основную роль среди физических величин, представляющих экспериментальный и теоретический интерес, играют фундаментальные константы.

Фундаментальными физическими константами (ФФК) называют постоянные, которые входят в уравнения, описывающие фундаментальные законы природы. ФФК возникают в теоретических моделях наблюдаемых явлений в виде универсальных коэффициентов в соответствующих математических выражениях. В силу этого эти константы являются основным инструментом, позволяющим сравнить теорию с экспериментом. Точность значений ФФК определяет пределы возможностей теоретических расчетов.

Таким образом, важной задачей является согласование значений ФФК – обработка результатов измерений физической константы, предоставленных разными источниками, для получения наиболее точного значения этой величины. Уточнение значений ФФК важно не только в физике, но и в метрологии. Метрологическая значимость определяется как ролью, которую ФФК играют для эталонных единиц, так и ролью, которую эталоны единиц играют для определения значений констант. Несмотря на важность этой проблемы, Руководство по выражению неопределенности измерения (Руководство) и его приложения не дают соответствующих указаний, и в настоящее время для этой цели применяются различные методы.

## 1 Методы оценки неопределенности ФФК

В настоящее время выделяют три надежных способа (метода) по количественной оценке неопределенности измерения:

- 1) Метод моделирования, изложенный в [1], с применением закона распределения неопределенности;
- 2) Метод моделирования Монте-Карло;
- 3) Эмпирические методы, основанные на внутрилабораторном или межлабораторном исследовании выполнения методов измерений (испытаний).

К ФФК относятся такие величины, как скорость света, Планка постоянная, заряд электрона, постоянные тонкой структуры, Авогадро, Ридберга и т.д.

Численные значения ФФК или их комбинаций находят на основе экспериментальных измерений и выражают в единицах какой-либо системы единиц. Получение из данных измерений наиболее точных и надежных значений для всей совокупности ФФК называется *согласованием* ФФК. Согласование включает анализ погрешностей измерений, определение надежности измерений и вычисление наиболее согласующихся значений ФФК [2]. Наиболее распространенным методом согласования ФФК является метод наименьших квадратов (МНК).

МНК, один из методов теории погрешностей для оценки неизвестных величин по результатам измерений, содержащим случайные погрешности. Общий смысл оценивания по МНК заключается в минимизации суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений зависимой переменной от значений, предсказанных моделью. Более точно, оценки наименьших квадратов параметра  $q$  получаются минимизацией функции  $Q$  по  $x$ , где:

$$Q = \sum [Y_i - f_i(x)]^2 \rightarrow \min_x, \quad (1)$$

где  $f_i(x)$  – это совокупность функций от набора переменных  $x$ ;  $Y_i = f_i(x) + \varepsilon_i$  при  $i = 1, \dots, n$ ,  $\varepsilon_i$  – случайные величины.

Таким образом, задача МНК заключается в подборе значений  $x$ , чтобы значения функций  $f(x)$  были максимально близки к известным значениям  $Y$ . В случае, если система уравнений имеет решение, то минимальное значение данной суммы квадратов будет равно нулю. Если количество  $Y$  больше количества  $x$ , то система не имеет точного решения и МНК позволяет найти оптимальный вектор  $x$ , при котором вектор отклонений  $\varepsilon$  максимально близка к нулю.

## 2 Программное обеспечение

Для исследования рассмотренного метода была разработана программа «МНК» в графической среде NI LabVIEW. Данная программа выполняет следующие функции:

- генерация случайных интервальных данных по нормальному закону распределения;
- согласование интервалов на основе МНК;
- визуализация результатов в графическом и числовом виде.

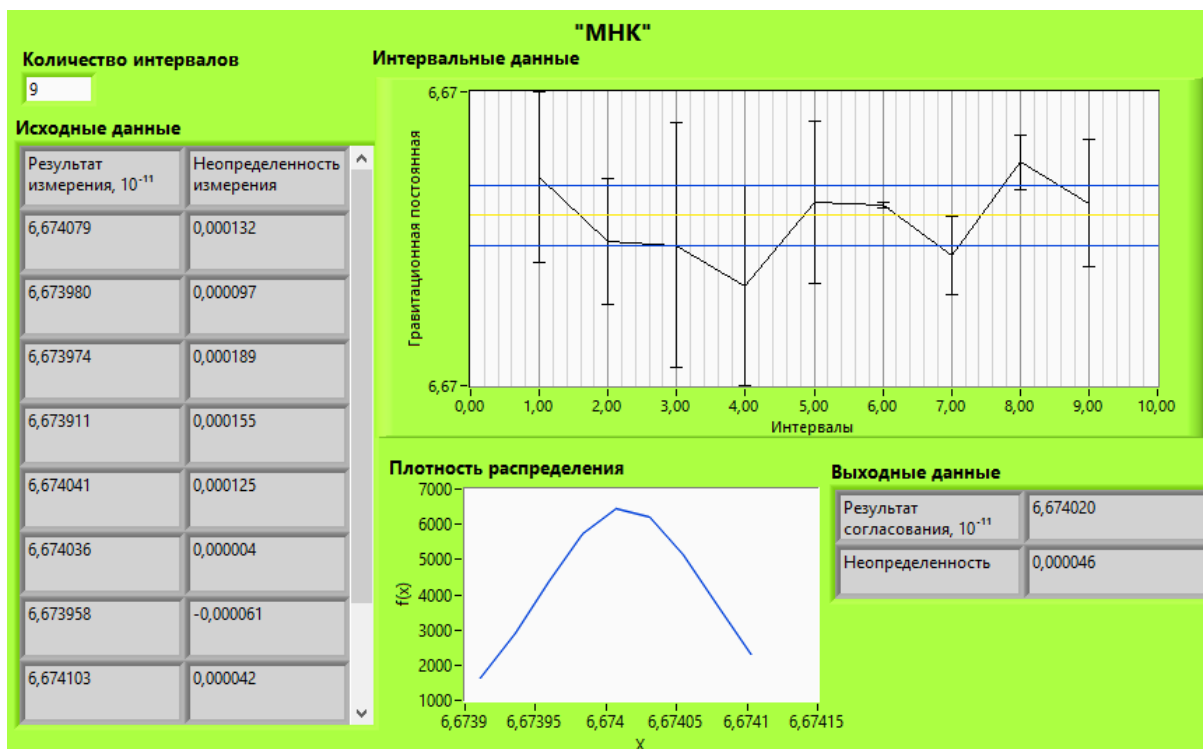


Рис. 1. Лицевая панель программы «МНК»

Генерация случайных интервальных данных осуществляется с использованием блока «Normal Random», который производит случайные значения, приближенные к значениям констант. Для экспериментальных исследований была выбрана гравитационная постоянная.

В 2014 году значение гравитационной постоянной, рекомендованное CODATA [3], стало равным:  $G = 6,67408(31) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ .

Сгенерированные данные согласовываются посредством алгоритма на основе МНК, для которой был реализован программный модуль.

Перед началом работы на лицевой панели (рисунок 1) программы пользователю необходимо указать количество интервалов. Далее пользователь запускает программу. На лицевой панели отображаются сгенерированные данные (результаты измерений с неопределенностями) в графическом и числовом виде, а также плотность распределения сгенерированных данных. Программа завершает работу после завершения операции. В результате работы программы «МНК» вычисляется результирующий интервал по методу наименьших квадратов  $I_r = [x_r \pm \varepsilon_r]$ , где средняя точка  $x_r$  – результат согласования, а  $\varepsilon_r$  – соответствующая неопределенность результата. Результирующий интервал отображается в виде таблицы на лицевой панели программы.

Далее был произведен сравнительный анализ полученного результата для гравитационной постоянной с рекомендованным значением данной константы в CODATA.

Таким образом, разработанная программа, позволила получить результирующее значение гравитационной постоянной, близкое к рекомендованному значению из CODATA.

### Заключение

В ходе изучения проблемы согласования значений фундаментальных физических констант был исследован алгоритм на основе метода наименьших квадратов. Для экспериментальных исследований алгоритма в графической среде программирования LabVIEW была разработана программа «МНК». Результаты исследований показали, что МНК позволяет получить значение ФФК, близкое к рекомендованному значению из CODATA.

### Список использованных источников

1. Введение к «Руководству по выражению неопределенности измерения» и сопутствующим документам. Оценивание данных измерений / Пер. с англ. под науч. ред. д.т.н., проф. В.А. Слаева, д.т.н. А.Г. Чуновкиной. – СПб.: «Профессионал», 2011. – 58 с.: ил.
2. Bodnar. O., Elster C., Fischer J., Possolo A., Toman B. Evaluation of uncertainty in the adjustment of fundamental constants // Metrologia. – 2016. – V 53. – Issue 1. – P. S46-S54;
3. CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?bg> свободный. – Загл. с экрана. – (Дата обращения 15.11.2018).