Продувка парового котла

Продувка паровых котлов – это распространённый способ уменьшения нежелательных примесей в водяном паре, поступающем в турбину, и борьбы с накипеобразованием в самом котле при не очень хорошем качестве питательной и добавочной воды.

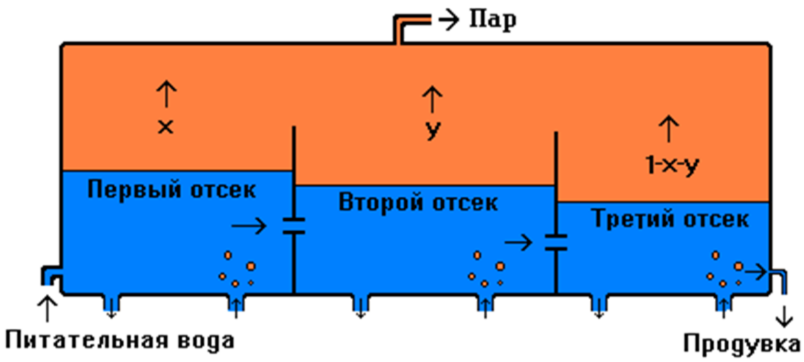
Давайте сделать в среде SMath интересный расчет – см. рис. 1-8 с необычной треугольной диаграммой (рис. 1-7).

Кроме того, в этом разделе будет описана функция поиска оптимума функции нескольких аргументов.

Продувку из барабана парового котла делают иногда в обычных докритических паротурбинных установках с целью, повторяем, снижения концентрации примесей в котловой воде и в паре, направляемом в турбину. Эти примеси могут отложится в проточной части паровой турбины и нарушить ее работу. Основной метод понижения концентрации примесей в паре, выходящем из парового котла, – это уменьшение их количества в питательной воде котла через качественную обработку добавочной воды. Но иногда приходится прибегать и к ступенчатому испарению в барабане котла, которую называют подарком теплотехников плохим химикам, неспособным обеспечить надлежащее качество питательной воды.

Рассмотрим трехступенчатое испарение. Третью ступень обычно конструктивно выполняют в виде выносного сепаратора, но она у нас будет организована внутри барабана.

На рисунке 1 показана схема трехступенчатого испарения, ввод исходных данных и формирования целевой функции – степень снижения концентрации примеси в насыщенном водяном паре в зависимости от двух параметров оптимизации – количества пара, генерируемого первом отсеке (x) и во втором отсеке (y). На третий отсек выпадают остатки (1-x-y). Задача имеет и ограничение – сумма значений параметров x и y не должно превышать 100%. Это типичная задача оптимизации с параметрами и ограничениями.



Задача:
найти значения x и y,
при которых концентрация
примеси в паре минимальна

Величина продувки $Pr := 2\ \%$

Суммарный коэффициент выноса примеси с паром 1-го отсека $K_1 := 0.00001$

Суммарный коэффициент выноса примеси с паром 2-го отсека $K_2 := 0.00003$ $\qquad K_n = \dfrac{C_{Sn}}{C_{Wn}}$

Суммарный коэффициент выноса примеси с паром 3-го отсека $K_3 := 0.00005$

Концентрация примеси в питательной воде $C_W := 10\ \mathrm{ppm}$

Расчет

$$C_W \cdot (1 + Pr) = K_1 \cdot C_{w1} \cdot x + C_{W1} \cdot (1 + Pr - x) \qquad C_{w1} \cdot (K_1 \cdot x + 1 + Pr - x) = C_W \cdot (1 + Pr)$$

$$C_{W1}(x) := \frac{C_W \cdot (1 + Pr)}{K_1 \cdot x + 1 + Pr - x} \qquad C_{S1}(x) := K_1 \cdot C_{W1}(x)$$

$$C_{W1} \cdot (1 + Pr - x) = K_2 \cdot C_{W2} \cdot y + C_{w2} \cdot (1 + Pr - x - y) \qquad C_{W2} \cdot (K_2 \cdot y + 1 + Pr - x - y) = C_{W1} \cdot (1 + Pr - x)$$

$$C_{W2}(x, y) := \frac{C_{W1}(x) \cdot (1 + Pr - x)}{K_2 \cdot y + 1 + Pr - x - y} \qquad C_{S2}(x, y) := K_2 \cdot C_{W2}(x, y)$$

$$C_{W2} \cdot (1 + Pr - x - y) = K_3 \cdot C_{W3} \cdot (1 - x - y) + C_{w3} \cdot Pr \qquad C_{W3} \cdot (K_3 \cdot (1 - x - y) + Pr) = C_{W2} \cdot (1 + Pr - x - y)$$

$$C_{W3}(x, y) := \frac{C_{W2}(x, y) \cdot (1 + Pr - x - y)}{K_3 \cdot (1 - x - y) + Pr} \qquad C_{S3}(x, y) := K_3 \cdot C_{W3}(x, y)$$

$$C_S(x, y) := x \cdot C_{S1}(x) + y \cdot C_{S2}(x, y) + (1 - x - y) \cdot C_{S3}(x, y)$$

Рис. 1. Создание целевой функции задачи о трехступенчатом испарении в барабанном котле – см. рис. 9 с автоматическим решением задачи

Целевая функция $\eta(x, y)$ формируется в процессе решения уравнений баланса примеси в трех отсеках – см. последний оператор на рис. 1.

На рис. 2 показана небольшая программа-функция, позволяющая трансформировать привычный прямоугольный X-Y декартов график в треугольную диаграмму.

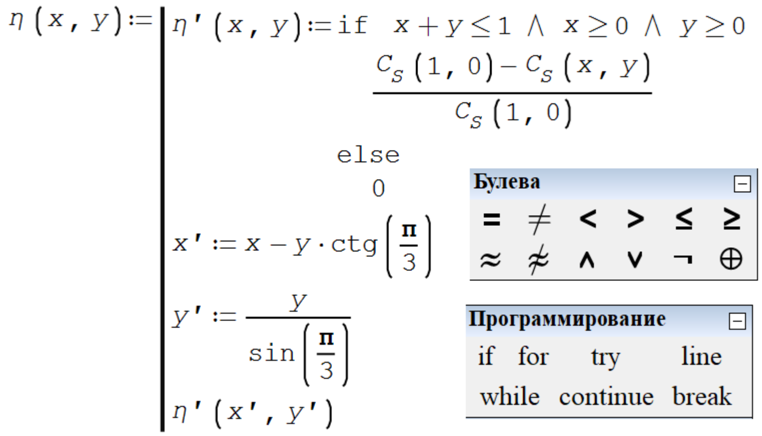


Рис. 2. Приведение функции двух аргументов к «треугольному» виду

На рис. 3 формируются две переменные: переменная *Δ* с координатами равнобедренного треугольника с единичными сторонами и переменная *CP* (counter plot) с линиями одного уровня для η = 1%, 10% и т.д. до 63%. Эти линии прочерчены на рис. 4, где четко видна точка максимума, обрамленная овалом значений η=63%.

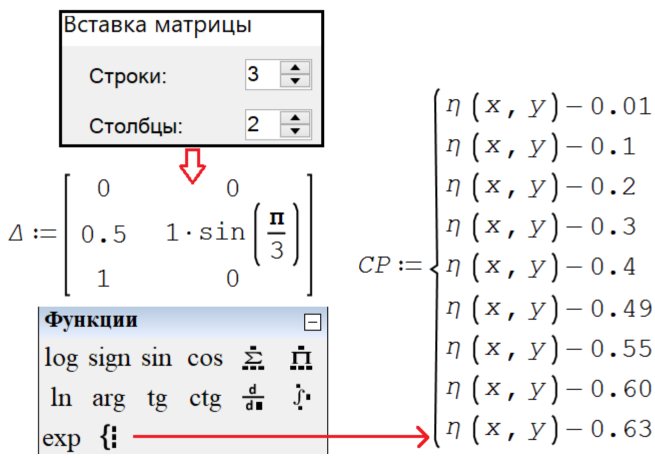


Рис. 3. Формирование данных для треугольной диаграммы

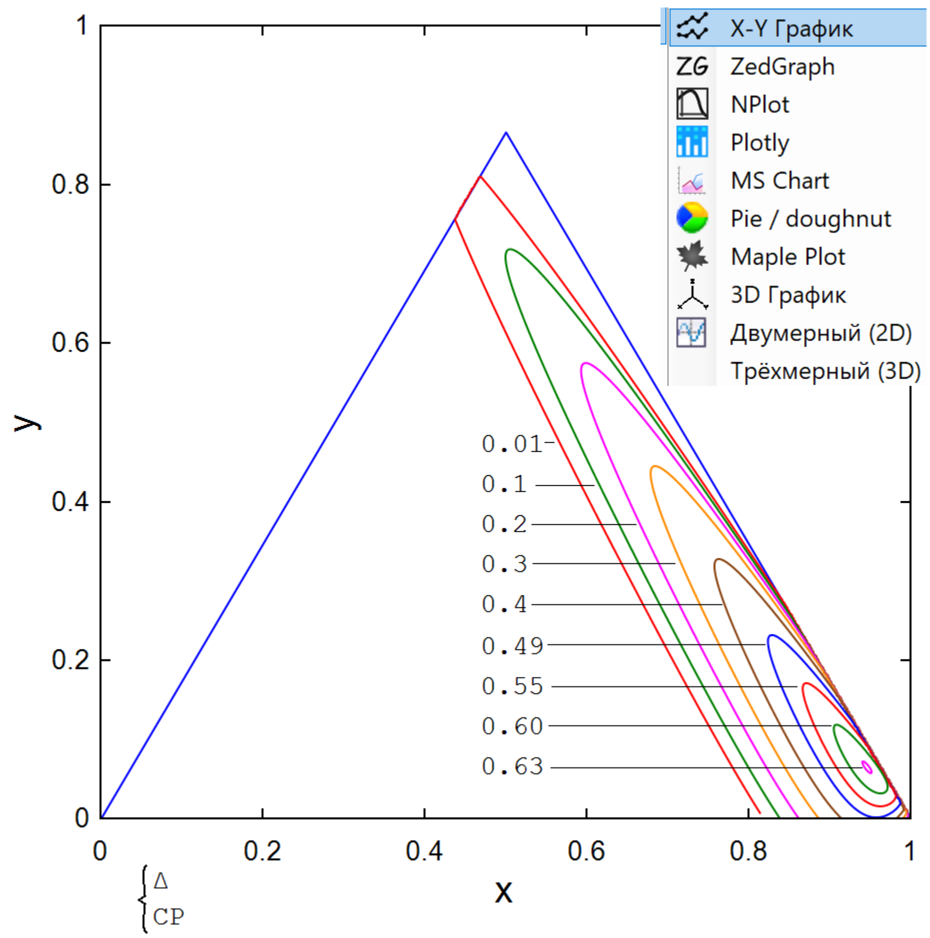


Рис. Треугольная диаграмма с линиями одного уровня

Для уточнения координат точки максимума была создана программа, показанная на рис. 5. Она реализует простейший алгоритм поиска оптимальной точки методом «Два шага». Из начальной заданной точки делаются шаги заданного размера во всех направлениях. А целевая функция может иметь не только два, но любое количество аргументов. Запоминается точка с максимальным значением, большим, чем в исходной точке. В эту точку делается переход для поиска новой подобной точки. Если такая точка не обнаружена, то шаг поиска уменьшается вдвое, а поиск продолжается. Как говорил один киноперсонаж «Это не эстетично, зато дешево, надежно и практично!». Шутки шутками, но в настоящее время наблюдается некий ренессанс простых и понятных численных методов решения задач. Многие сложные алгоритмы, в которых в настоящее время не разберутся даже сами разработчики, создавались во времена тихоходных электронных вычислительных машин. Сейчас скорость ЭВМ значительно возросла, что позволяет без особых проблем работать на них по простейшим понятным алгоритмам.

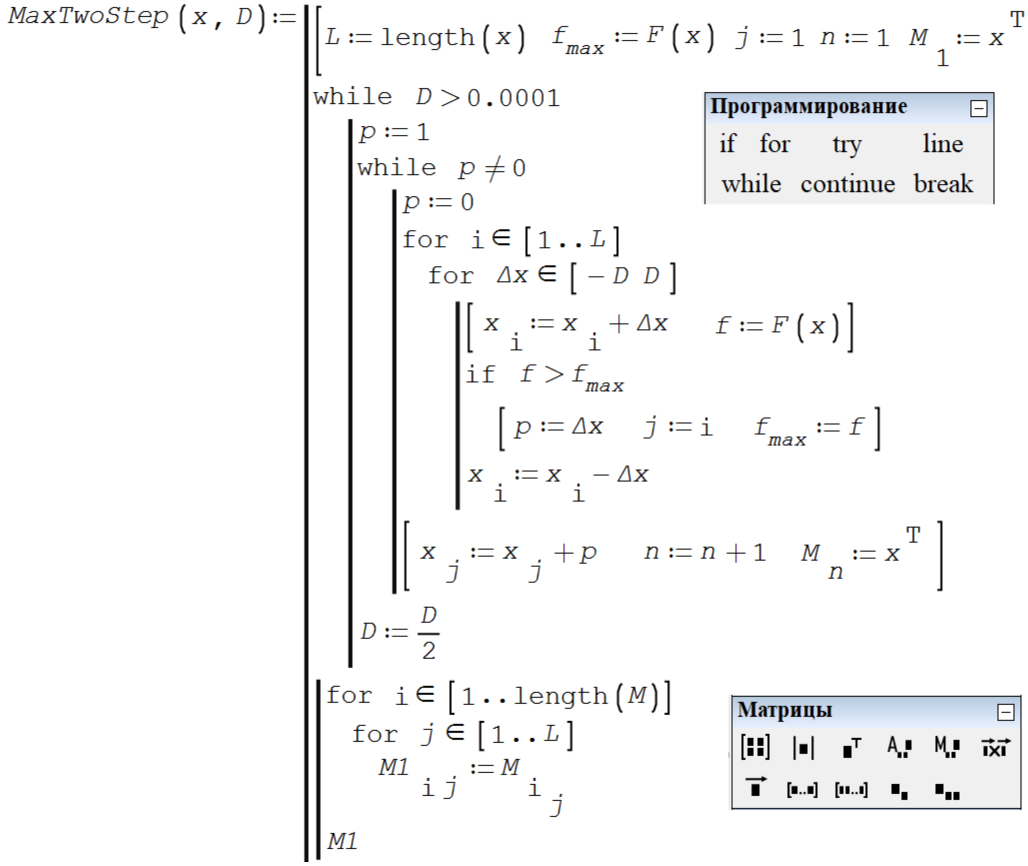


Рис. 5. Функция «Два шага» для поиска максимума функции нескольких аргументов

Функция «Два шага» кроме того позволяет видеть трассировку поиска точки максимума, выдавая матрицу промежуточных значений – см. рис. 6. Всего же сделана тридцать одна итерация.

$F(x) := \eta\left(x_1, x_2\right)$ $\quad M := MaxTwoStep\left(\begin{bmatrix} 0.85 \\ 0.15 \end{bmatrix}, 0.05\right)$ $\quad n := \text{rows}(M) = 31$

$x_{opt} := M_{n\,1} = 94.55\ \%$ $\quad y_{opt} := M_{n\,2} = 6.543\ \%$ $\quad \eta\left(x_{opt}, y_{opt}\right) = 63.11\ \%$

$Opt := \text{augment}\left(x_{opt}, y_{opt}, \text{"o"}, 7, \text{"black"}\right)$

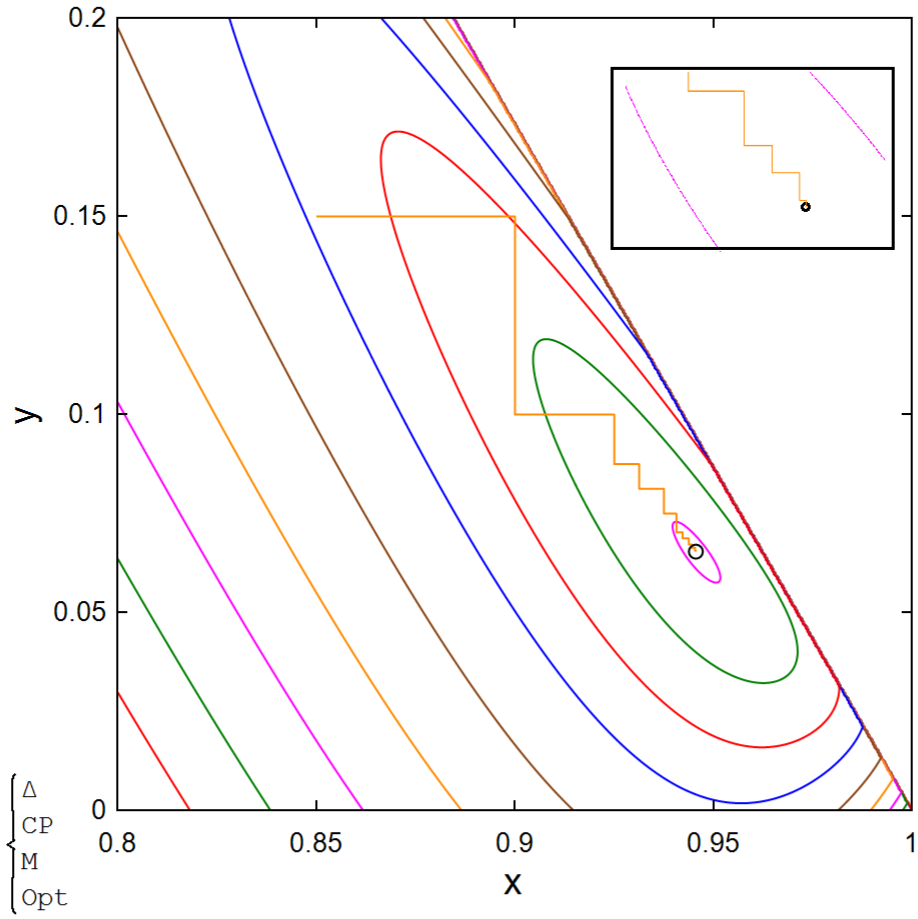
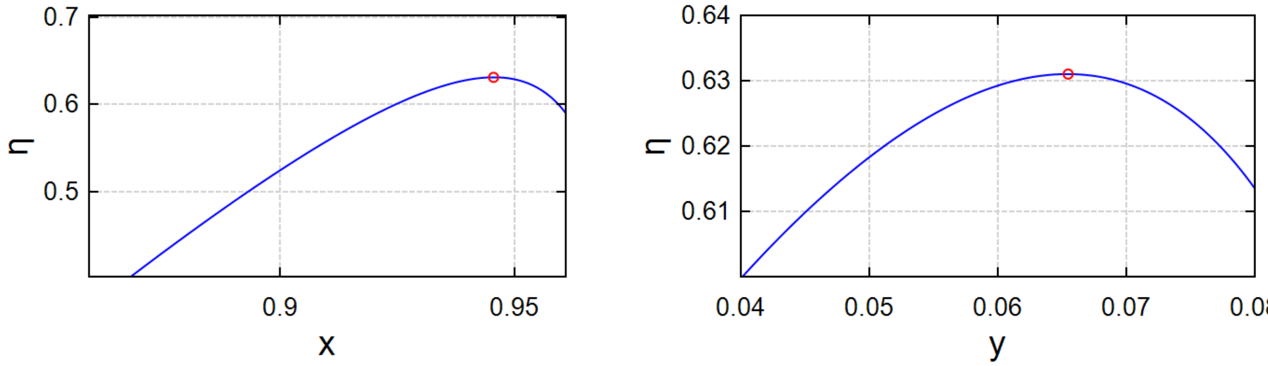


Рис. 6. Трассировка работы функции «Два шага»

На рисунке 7 для дополнительной проверки показаны сечения поверхности функции $\eta(x, y)$ по двум аргументам в найденной точке максимального значения. Все верно: найденные точки — это максимумы двух горбатых линий. См. также рис. 2.9 в главе 2 с аналогичными «горбатыми линиями».



$$\left\{\begin{array}{l} \eta\left(x, y_{opt}\right) \\ \mathrm{augment}\left(x_{opt}, \eta\left(x_{opt}, y_{opt}\right), \text{"o"}, 5, \text{"red"}\right) \end{array}\right. \qquad \left\{\begin{array}{l} \eta\left(x_{opt}, y\right) \\ \mathrm{augment}\left(y_{opt}, \eta\left(x_{opt}, y_{opt}\right), \text{"o"}, 5, \text{"red"}\right) \end{array}\right.$$

Рис. 7. Верификация процесса поиска максимума функции двух аргументов

Ремарка О символьном решении алгебраического уравнения и искусственном интеллекте

На рисунке 1 показано, как из уравнений баланса примесей для трех отсеков барабана парового котла в ручном режиме с использованием промежуточного уравнения создаются вспомогательные функции пользователя с именами C_{w1}, C_{w2} и C_{w3}.

Ручной режим несложных символьных преобразований предпочтителен тем, что он позволяет лишний раз тренировать голову. Но он опасен тем, что чреват возможными ошибками, опечатками (ачипятками). Поэтому рекомендуется дублировать ручные действия с помощью инструментов компьютерных аналитических преобразований – с помощью символьной математики, что было сделано в среде американского аналога пакета SMath – в среде пакета Mathcad (см. рис. 9). Студенты должны сделать это в среде SMath.

$$Cw \cdot (1+Pr) = K1 \cdot Cw1 \cdot x + Cw1 \cdot (1+Pr-x) \xrightarrow{solve, Cw1} \frac{Cw \cdot Pr + Cw}{(K1-1) \cdot x + Pr + 1}$$

Рис. 9. Символьное решение в среде Mathcad уравнения баланса примеси в первом отсеке барабана парового котла

Решение на рисунке 9 авторам не понравилось, так как оно опять же требовало ручной доработки до вида, показанного на рис. 1 и 10. А это опять же чревато новыми ошибками и опечатками.

$$\frac{Cw \cdot (1+Pr)}{K1 \cdot x + Pr + 1 - x}$$

Рис. 10. Выражение для концентрации примеси в первом отсеке парового котла

Было решено найти корень уравнения еще раз, но уже на популярном портале WolframAlpha.com – см. рис. 11. Этот интернет-ресурс оборудован средствами искусственного интеллекта, который иногда ведет себя согласно пословице «Заставь дурака богу молиться, так он и лоб расшибет!».

Приведенная пословица, конечно, довольно груба, но посудите сами! Портал WolframAlpha.com посчитал, что переменные Pr, C и K в введенном уравнении это… химические элементы празеодим, углерод и калий, и вывел на экран… периодическую таблицу Менделеева, отметив в ней данные элементы.

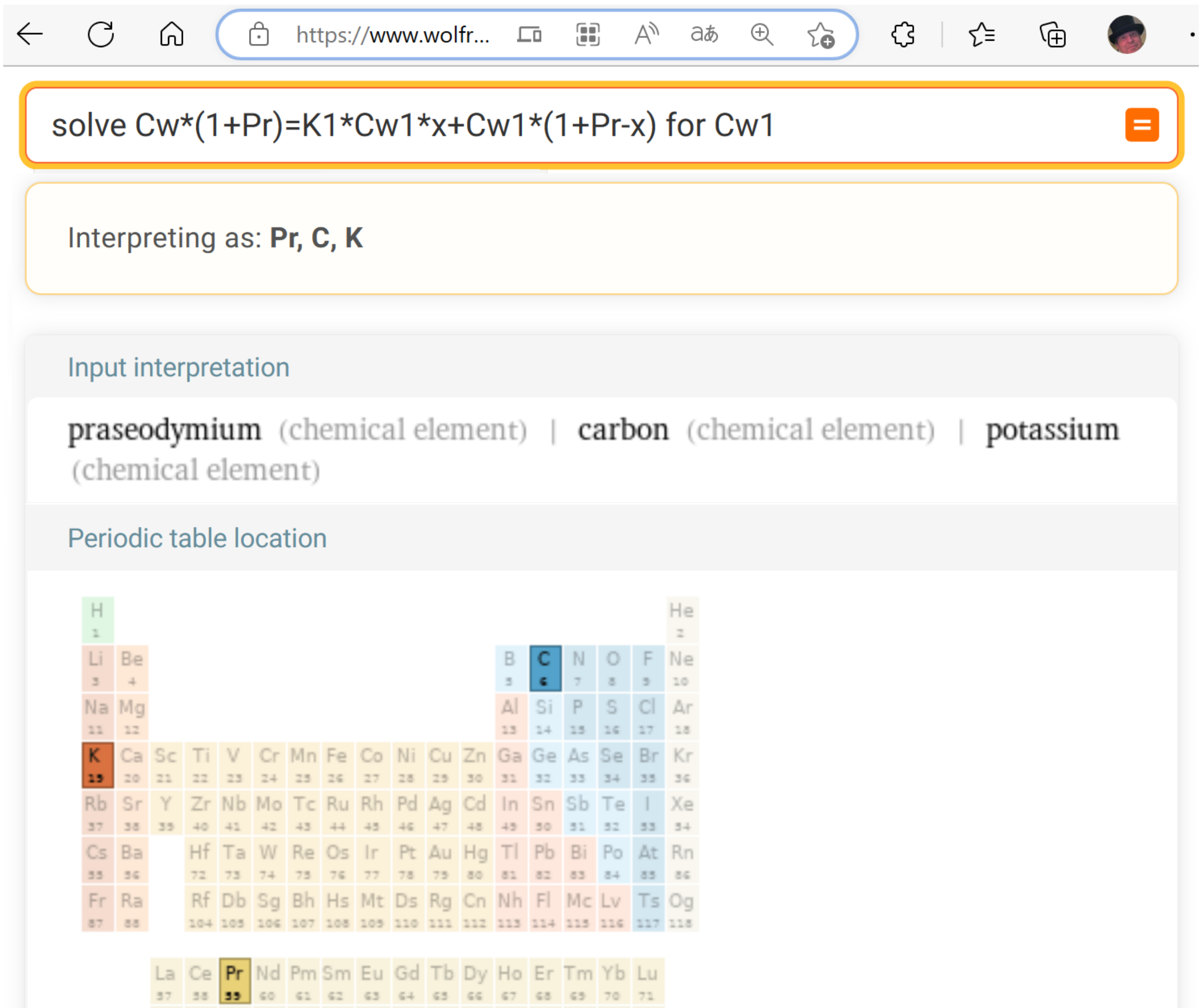


Рис. 11. Попытка решения алгебраического уравнения на портале WolframAlpha.com

Сразу вспомнилась нашумевшая история про искусственный интеллект, которому поручили вместо человека-оператора вести телепередачу футбольного матча. Задача была довольно проста – направлять телекамеру строго на футбольный мяч – на гладкий круглый предмет, перемещающийся по полю. Так вот, этот искусственный интеллект в какой-то момент потерял мяч, стал его искать и… захватил лысую голову судьи, бегавшего по полю. Так телезрители – футбольные болельщики до конца матча имели возможность любоваться лысиной рефери.

Дополнительное задание:

Составьте математическую модель четырех-, пяти- и т.д. ступенчатого испарения в барабане котла