Определение энергии альфа-частиц по величине их пробега в воздухе

Шмаков Владимир — ФФКЭ - Б04-105

Цель работы

- Измерить пробег α-частиц двумя способами — при помощи сцинтилляционного счетчика и при помощи ионизационной камеры.
- По полученным величинам пробега оценить энергию α-частиц

Теоретические сведения

При прохождении в веществе α-частицы теряют свою энергию в результате неупругих столкновений с атомами вещества. Эти потери вызывают ионизацию атомов вещества, поэтому такие потери называются *ионизационными потерями*.

Нильс Бор вывел формулу, описывающую потери энергии в результате взаимодействия частицы с электронами:

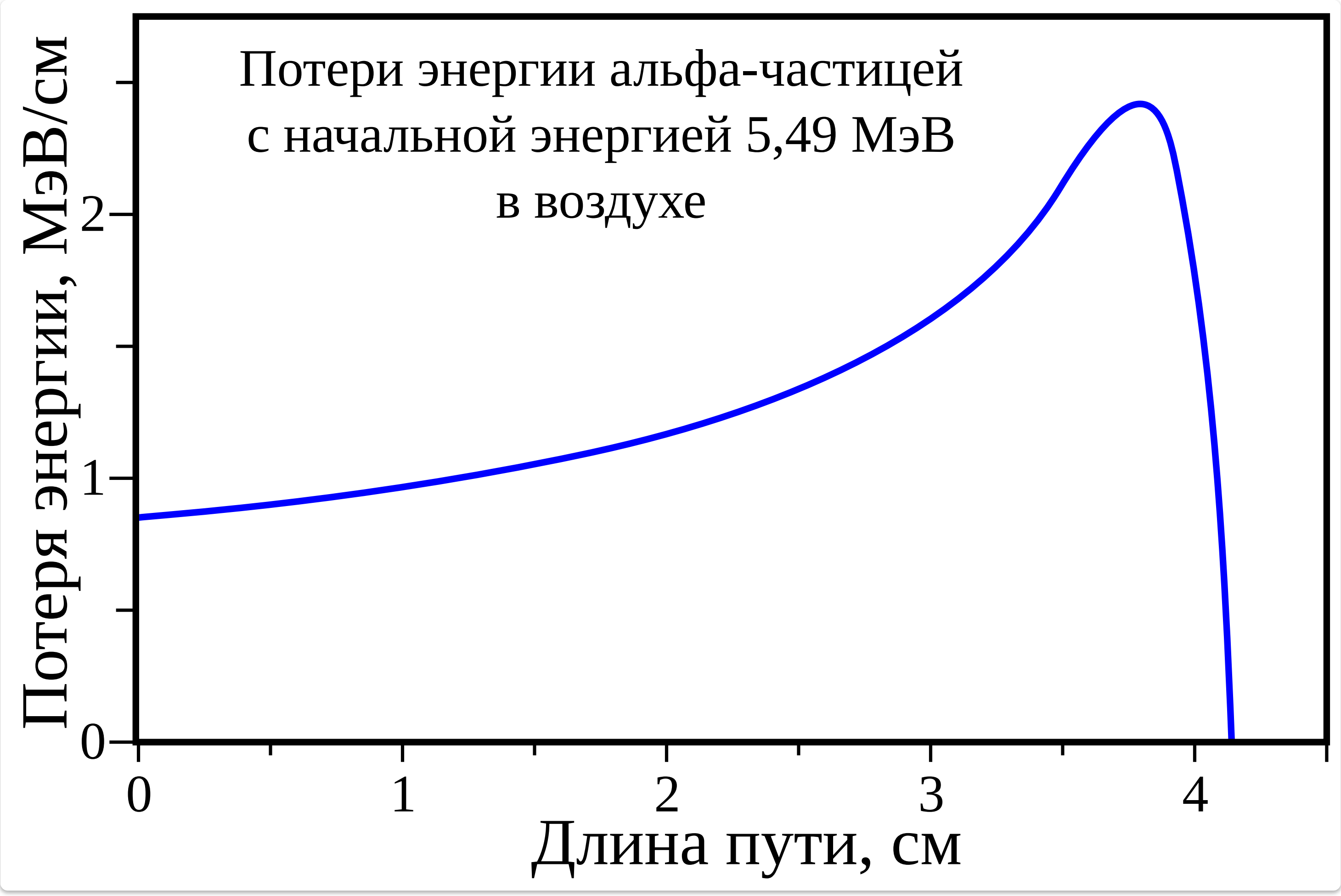
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = 4\pi\frac{e^4z^2}{mv^2}nZ\ln\frac{y_{max}}{y_{min}} \tag{1}$$

Формула (1) выражает потери энергии на единице пути в результате взаимодействия с электронами на любых возможных прицельных расстояниях(лежащих в диапазоне от y_{min} до y_{max}). *Прицельное расстояние* — расстояние между частицей и свободным электроном.

Средний ионизационный потенциал $\bar{I}$ — минимально возможное значение потерянной энергии частицы. Выражение (1) может быть переписано с использованием величины $\bar{I}$:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = 4\pi\frac{e^4z^2}{mv^2}nZ\ln\frac{2mv^2}{\bar{I}} \tag{2}$$

Величину dE/dx называют *тормозной способностью вещества*. Зависимость dE/dx от пути, пройденной частицей в веществе, описывается кривой Брэгга(смотрите рисунок 1).



> *Рисунок 1. Кривая Брэгга — зависимость тормозной способности от пройденного частицей пути*

Зная зависимость тормозной способности от пути, несложно найти пробег частицы — путь при прохождении которого энергия частицы станет равной нулю(смотрите формулу 3).

$$R \propto E^2 \tag{3}$$

> *Формула описывающая зависимость пробега частицы от начальной энергии. Выведена при предположении что частица взаимодействует только с электронами*

При обработке экспериментальных данных часто пользуются эмпирическим соотношением (4), связывающем энергию и пробег частицы:

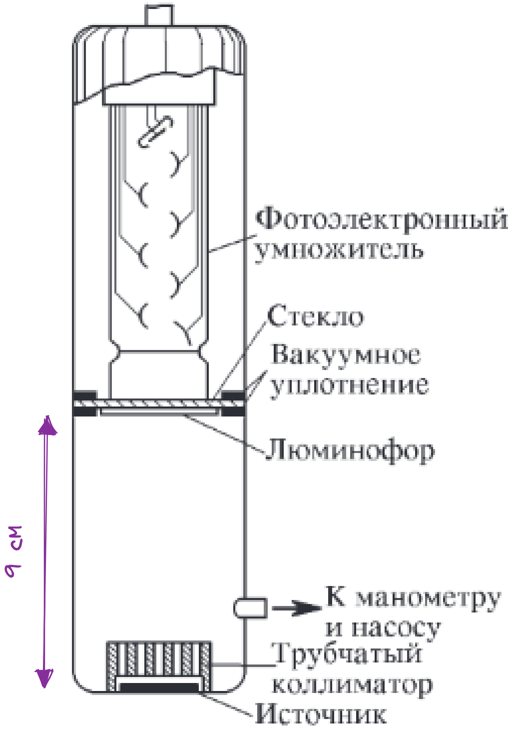
$$R = 0.32E^{3/2} \tag{4}$$

> *Связь энергии частицы с её пробегом. R(при $15^{\circ}C$ и нормальном атмосферном давлении).*

Методика

Сцинтилляционный счетчик

Описание счетчика представлено на рисунке 2:

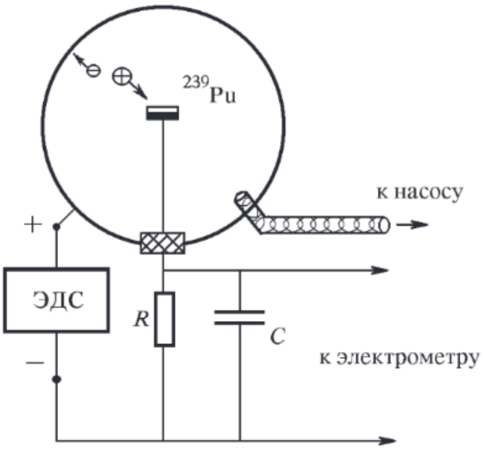


При попадании на частицы на люминофор происходит свечение. Сигнал фотоумножителя попадает на пересчетное устройство.
При меньшем давлении долетает большее число альфа-частиц.
Так определение пробега сводится к измерению зависимости интенсивности счета от давления в камере.

> *Рисунок 2. Принцип работы сцинтилляционного счетчика.*

Ионизационная камера

Принцип работы ионизационной камеры представлен на рисунке (3):



Ионизационная камера - прибор для количественного измерения ионизации, произведённой заряженными частицами при прохождении через газ.

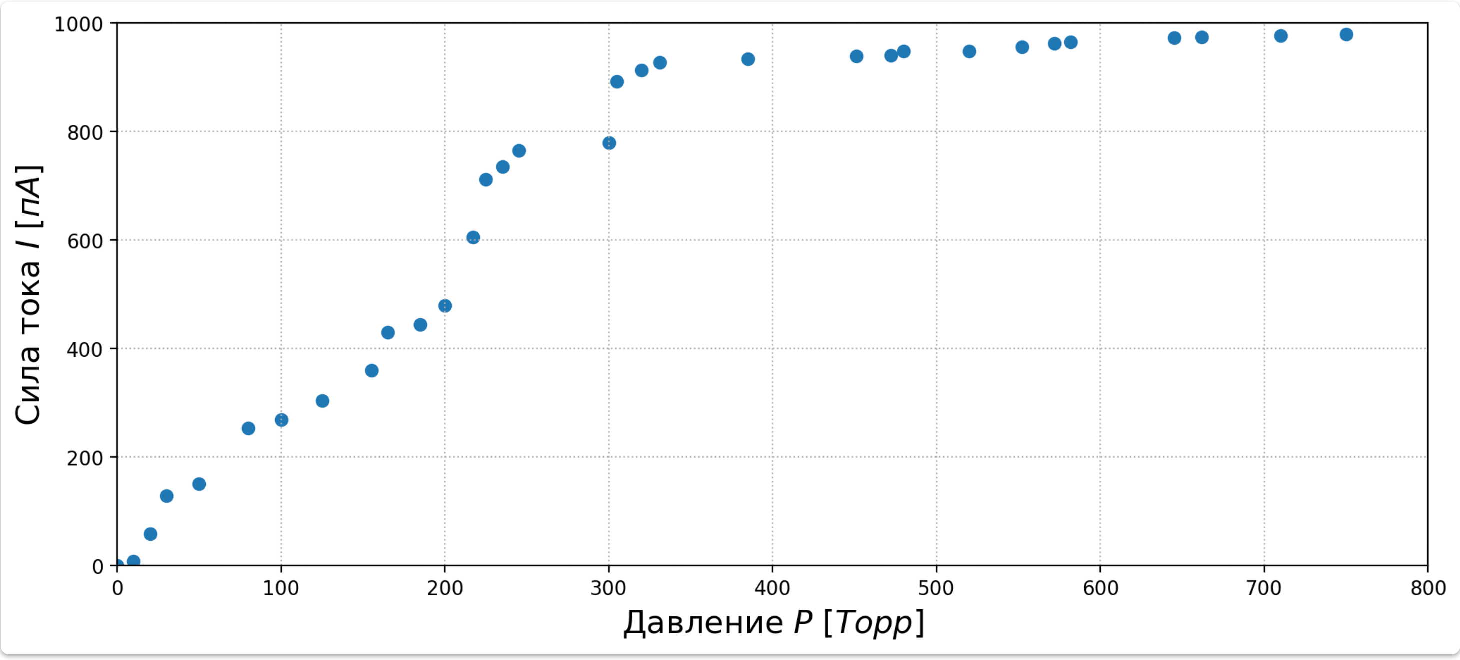
Определение свободного пробега сводится к измерению зависимости силы тока от давления.

> *Рисунок 3. Принцип работы ионизационной камеры.*

Обработка результатов эксперимента

Ионизационный счетчик

Данные полученные в ходе эксперимента представлены на рисунке (4):

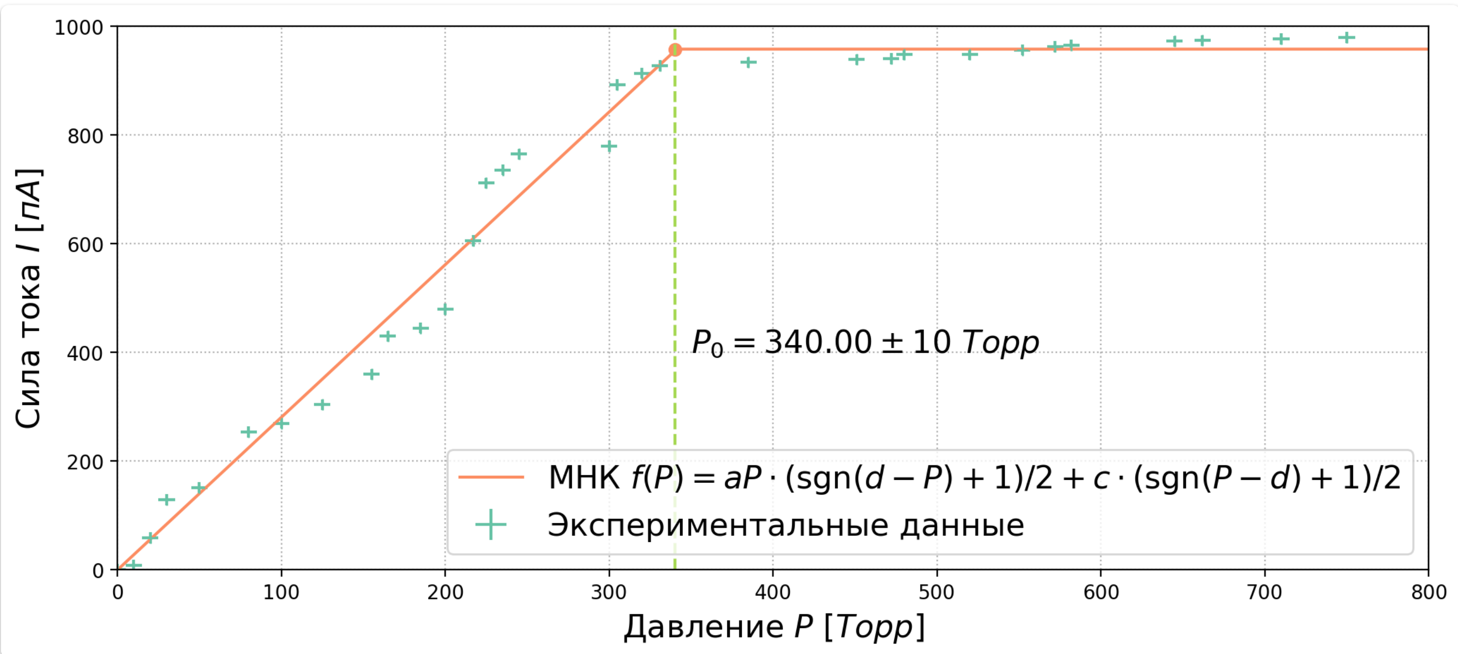


> *Рисунок 4. Экспериментальные данные.*

Интерполируем данные функцией вида:

$$f(P) = \begin{cases} aP, & P < P_0 \\ c, & P \geq P_0 \end{cases}$$

Такая интерполяция поможет отделить линейную часть зависимости от зависимости вида $f(P) = C$. Результат интерполяции представлен на рисунке (5):



> *Рисунок 5. Интерполяция экспериментальных данных — нахождение P_0.*

Теперь, посчитаем длину свободного пробега R:

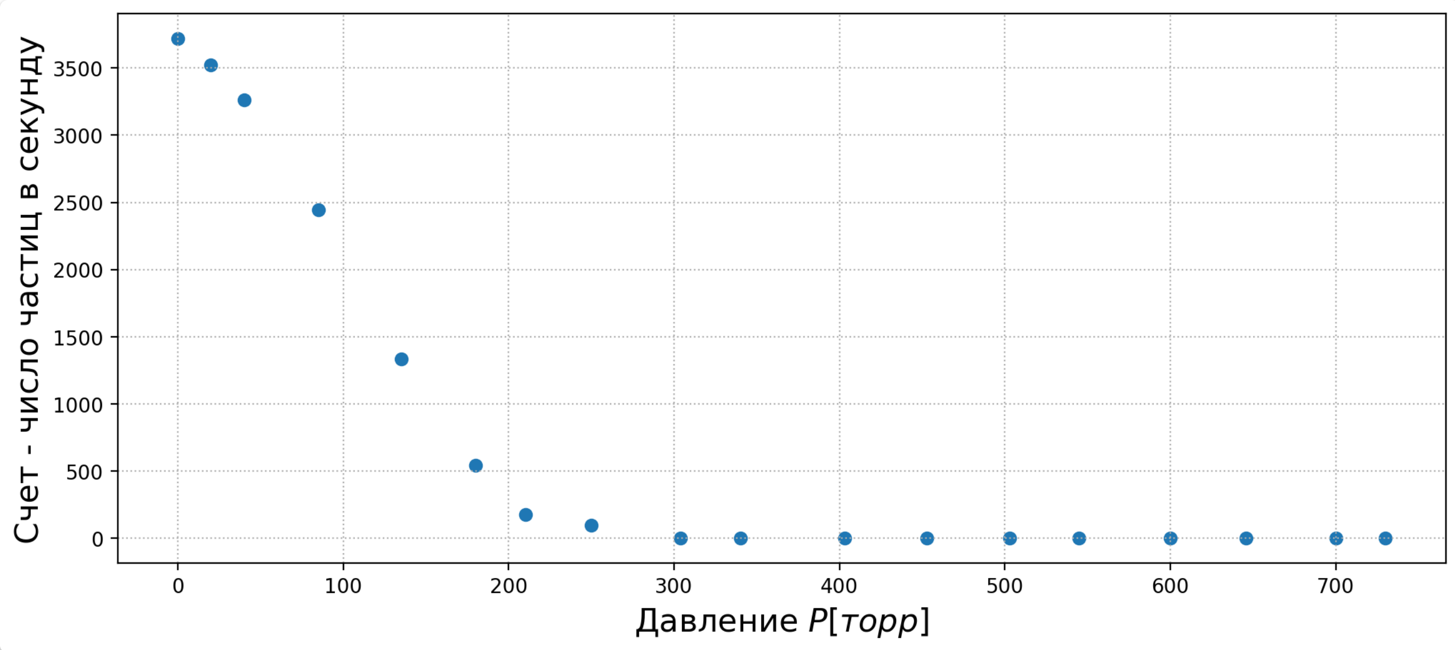
$$R = \frac{(15+273) \cdot P0 \cdot 4.75}{T \cdot 760} \sim 2.1 \pm 0.1 \; см$$

По формуле (4) оценим энергию α-частицы:

$$E \sim \left(\frac{R}{0.32}\right)^{2/3} \sim 3.5 \pm 0.15 \; МэВ$$

Сцинтилляционный счетчик

Экспериментальные данные представлены на рисунке 6:



> *Рисунок 5. Данные полученные в ходе эксперимента*

Можно заметить, что график похож на <<функцию нормального распределения наоборот>>. С такой функцией распределения мы знакомились на электронике — она носит название функции Ферми-Дирака. Эта функция задаёт числа заполнения квантовых состояний в системе тождественных фермионов(одно квантовое состояние не может быть занято более чем одной частицей).

Методом наименьших квадратов приблизим экспериментальные данные функцией распределения Ферми-Дирака. Для нормировки введём параметры A и B:

$$\hat{N}(P) = \frac{A}{\exp((P-d)/c)+1} + B$$

> *Функция используемая для приближения экспериментальных данных.*

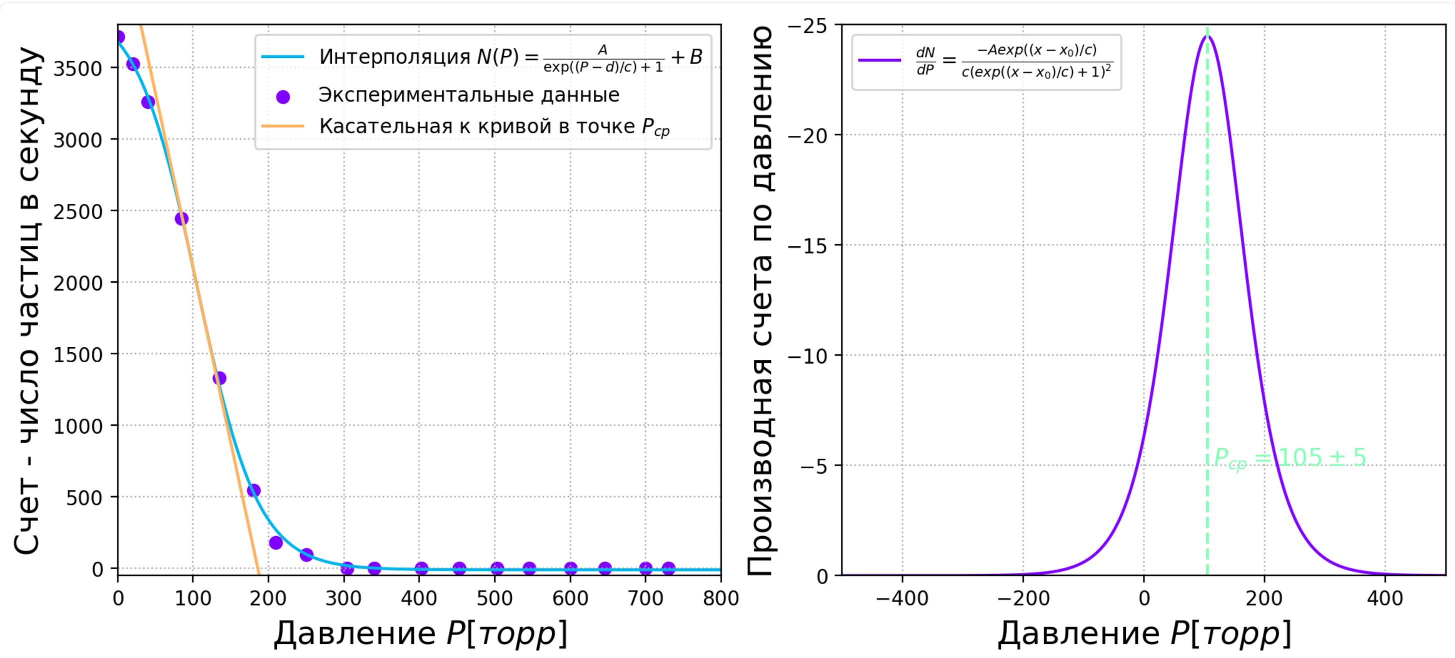


Рисунок 6. Приближение экспериментальных данных функцией распределения Ферми-Дирака. Слева изображены экспериментальные

Найдя нормировочные константы и параметры распределения оценим <<среднее значение>> давления, и эффективное значение давления. Аналогично предыдущему пункту вычислим пробег α частиц:

$$R_{ср} = 1.21 \pm 0.06\ см \quad R_{эфф} = 2.15 \pm 0.08\ см$$

По формуле (4) пересчитаем полученные значения в энергию:

$$E_{ср} = 2.4 \pm 0.1\ МэВ \quad E_{эфф} = 3.6 \pm 0.2\ МэВ$$

Вывод

Используя две установки удалось оценить величину пробега α частиц и их энергию. Для $^{239}\mathrm{Pu}$ табличное значение энергии α частиц составляет $\sim 5.1 МэВ$. Таким образом, результаты обоих экспериментов не совпали с табличным значением. Расхождение составило около 25%.

Столь большое расхождение может быть связано как с неидеальностью теоретической модели, так и с неправильно введёнными параметрами установок.

Если параметры установки учтены правильно, то эмпирическая константа в формуле (4) должна оказаться равной 0.187(уменьшиться вдвое).

При обработке экспериментальных данных была замечена <<связь>> между функцией распределения Ферми-Дирака и зависимостью счета от давления(смотрите рисунок 6). Теоретических обоснований такой <<связи>> найдено не было.