

# Поляризация диэлектрика не меняет форму его молекул

Р.И. Храпко

Московский авиационный институт

Критикуется учение о квазиупругих диполях диэлектрика, которые якобы растягиваются при поляризации для запасания энергии поляризации

**Ключевые слова:** модель молекул диэлектрика; эффект Штарка

Теория поляризации диэлектриков содержит, на наш взгляд, несколько дискуссионных моментов. Например, как хорошо известно, электрическая энергия конденсатора увеличивается в  $\epsilon$  раз, когда конденсатор заполняется диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , если при этом сохраняется макроскопическое электрическое поле  $E$ . Другими словами, если мы имеем два одинаковых конденсатора с одинаковым электрическим полем  $E$  и, соответственно, с одинаковым напряжением  $u$  между пластинами, но один из них заполнен диэлектриком, а другой – нет, то энергия заполненного конденсатора будет больше, чем энергия не заполненного. Возникает вопрос, в каком виде содержится эта добавочная энергия в диэлектрике? Является ли она по-прежнему энергией электрического поля, или она имеет другую природу? Мы просмотрели дюжину монографий и учебников [1 – 12], однако только в двух [11, 12] нашли рассуждения, касающиеся энергии поляризации. Авторы остальных книг просто игнорируют этот вопрос, хотя физический механизм, ответственный за возникновение поляризационной энергии, имеет, на наш взгляд, определенное научное и педагогическое значение.

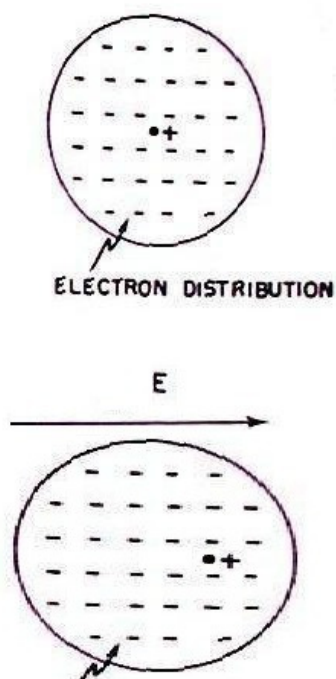


Fig. 10-4. An atom in an electric field has its distribution of electrons displaced with respect to the nucleus.

Fig. 1

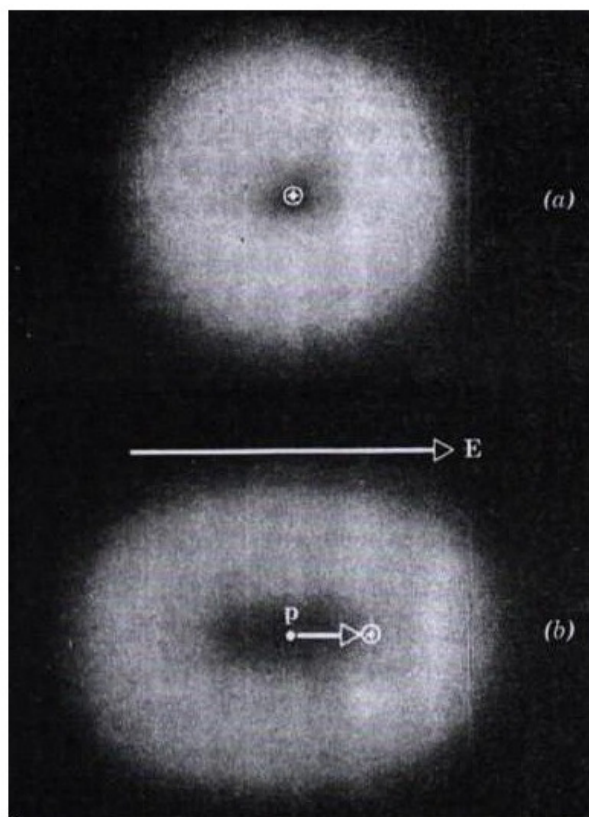


Fig. 29-12

Рассуждения об энергии поляризации сводятся к следующему. Дополнительная энергия в диэлектрике затрачивается на **удлинение (растяжение)** атомов или молекул при их

поляризации<sup>1</sup>, поскольку атом рассматривается как пара зарядов разного знака, которые как бы связаны пружинкой. Автор [12] называют эту энергию «энергией пружинок»<sup>2</sup>,  $kx^2/2$ , при этом, не выясняя природу этой энергии<sup>3</sup>.

Мы внимательно изучили эту идею и показали ее ошибочность [13,14]. В действительности «энергия пружинок» равна нулю, и равна нулю разность потенциалов на торцах поляризованных молекул, а избыток энергии заполненного диэлектриком конденсатора возникает исключительно из-за неоднородности электрического поля внутри диэлектрика, вследствие квадратичной зависимости энергии от напряженности поля. Дело в том, что в поляризованном диэлектрике усредненное электрическое поле, создающее разность потенциалов, существует только *между* поляризованными молекулами, а потому оно должно быть больше по величине, чем однородное поле пустого конденсатора, обеспечивающее ту же разность потенциалов.

Однако целью настоящей заметки является доказательство того, что даже никакого растяжения атомов, о котором пишут все авторы и которое представлено на рисунках Fig. 1 [6] и Fig. 29-12 [8], на самом деле, вовсе не происходит. Нет причин для растяжения электронного облака при поляризации атома. **Изображенное на рисунках растяжение облака происходило бы в неоднородном силовом поле. Подобным образом приливные (неоднородные) гравитационные силы растягивают тело при, скажем, падении его в черную дыру (см. коллаж)** Однако однородное силовое поле, в частности, электрическое поле в отношении электрона, просто смещает электронное облако относительно положительного ядра без существенного изменения его формы. Точный расчет волновой функции электрона в атоме при наличии внешнего поля выходит за рамки настоящей заметки. Однако достаточные доводы против растяжения облака можно сделать на основании решения уравнения Шредингера в параболических координатах при расчете эффекта Штарка [15].



Рис. 3.

При поляризации атома происходит смещение электронного облака



Смещение электронного облака при поляризации атома, которое не сопровождается его растяжением, схематически показано на рисунке 3. Так что все монографии и учебники попросту вводят учащихся в заблуждение.

Хотелось бы обратить внимание на еще одну неточность рисунка Fig. 29-12. Дело в том, что темное пятно в центре означает малую вероятность для электрона находиться вблизи ядра, тогда как в действительности эта вероятность как раз наибольшая вблизи ядра для невозбужденного состояния атома.

Мы приведем теперь математические доводы против растяжения электронного облака атома при поляризации. Параболические координаты  $\xi, \eta, \phi$  связаны с декартовыми координатами соотношениями [15]

<sup>1</sup> **stretching the dielectric molecules** [12]

<sup>2</sup> the spring energy,  $kx^2/2$ , associated with polarizing each molecule [12]

<sup>3</sup> The "spring" itself **may be** electrical in nature [12]

$$x = \sqrt{\xi\eta} \cos \varphi, \quad y = \sqrt{\xi\eta} \sin \varphi, \quad z = (\xi - \eta)/2, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = (\xi + \eta)/2$$

$$\xi = r + z, \quad \eta = r - z, \quad \varphi = \arctg \frac{y}{x}. \quad (1)$$

Координатные линии параболических координат в плоскости  $x, z$  или  $y, z$  представлены, например, в [16]. Важно отметить, что на положительной полуоси  $z$ , то есть там, где  $z = r$ , справедливо  $\eta = 0, \xi = 2z$ , а на отрицательной полуоси  $z$ , то есть там, где  $z = -r$ , справедливо  $\xi = 0, \eta = -2z > 0$ .

Для основного состояния атома водорода уравнение Шредингера выглядит так [15]:

$$(\Delta - e^2 + \frac{2}{r} - 2Ez)\psi = 0. \quad (2)$$

Здесь параметр  $-e^2$  означает удвоенную энергию  $E$  состояния атома,  $e^2 = -2E$ , а напряженность электрического поля, направленного вдоль оси  $z$ , обозначена, как и выше, буквой  $E$ . Решение уравнения (2) ищется в виде  $\psi = \frac{\chi_1(\xi)\chi_2(\eta)}{\sqrt{\xi\eta}}$ . Это позволяет разделить

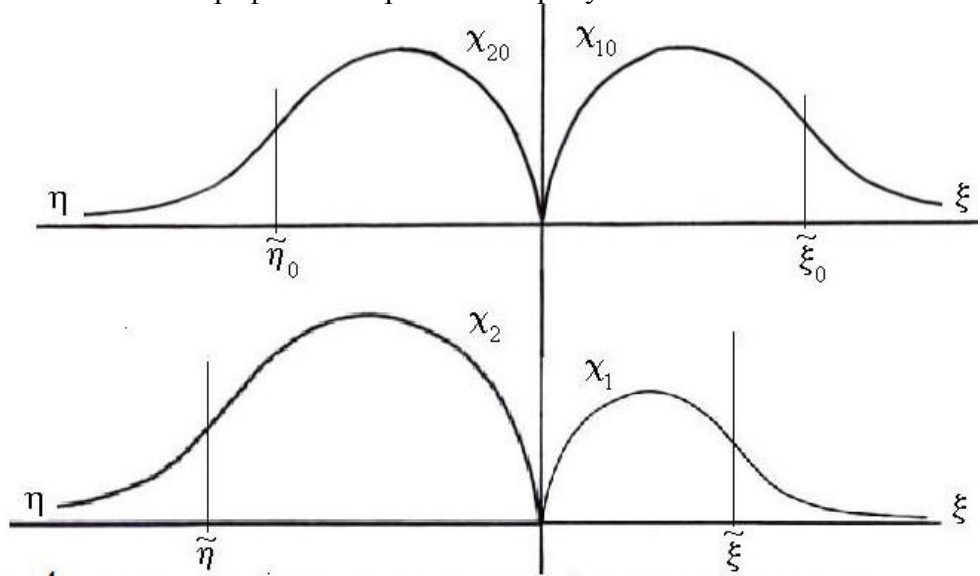
переменные:

$$\frac{d^2\chi_1}{d\xi^2} = \left(\frac{e^2}{4} - \frac{\beta_1}{\xi} - \frac{1}{4\xi^2} + \frac{E\xi}{4}\right)\chi_1, \quad \frac{d^2\chi_2}{d\eta^2} = \left(\frac{e^2}{4} - \frac{\beta_2}{\eta} - \frac{1}{4\eta^2} - \frac{E\eta}{4}\right)\chi_2, \quad \beta_1 + \beta_2 = 1. \quad (3)$$

При отсутствии электрического поля,  $E = 0$ , эти уравнения, очевидно, имеют решения

$$\chi_{10} = \sqrt{\xi} \exp(-\xi/2), \quad \chi_{20} = \sqrt{\eta} \exp(-\eta/2), \quad e^2 = 1, \quad \beta_{10} = \beta_{20} = 1/2, \quad (4)$$

так что мы имеем  $\psi_0 = \exp(-r)$ , как и должно быть, однако мы обратим внимание на графики функций  $\chi_{10}$  и  $\chi_{20}$  вдоль оси  $z$  и на изменение этих графиков при появлении электрического поля  $E$ . Эти графики изображены на рисунке 4.



**Рис. 4.** Показано, как изменяется волновая функция электрона при появлении электрического поля: сдвиг электронного облака при  $z > 0$  равен сдвигу при  $z < 0$

Точки перегиба графиков,  $\tilde{\xi}, \tilde{\eta}$ , на основании (4.3), удовлетворяют уравнениям

$$F_1(\tilde{\xi}, E) = 0, \quad F_2(\tilde{\eta}, E) = 0, \quad (5)$$

где

$$F_1(\xi, E) = \frac{e^2}{4} - \frac{\beta_1}{\xi} - \frac{1}{4\xi^2} + \frac{E\xi}{4}, \quad F_2(\eta, E) = \frac{e^2}{4} - \frac{\beta_2}{\eta} - \frac{1}{4\eta^2} - \frac{E\eta}{4}. \quad (6)$$

При  $E = 0$  уравнения (5) и (4) дают начальные координаты точек перегиба:  $\tilde{\xi}_0 = \tilde{\eta}_0 \equiv 2.4$ . Вычислим теперь, как смещаются точки перегиба  $\tilde{\xi}$  и  $\tilde{\eta}$  при появлении электрического поля. Мы учтем при этом отсутствие линейного эффекта Штарка для основного состояния атома,  $de^2/dE = 0$ , и зависимость параметров разделения переменных  $\beta$  от  $E$ :  $\beta_1 = 1/2 + E/2$ ,  $\beta_2 = 1/2 - E/2$ . Подсчитаем производные  $d\tilde{\xi}/dE$  и  $d\tilde{\eta}/dE$  при  $E = 0$ :

$$\frac{d\tilde{\xi}}{dE} = -\frac{dF_1}{\partial F_1} = \frac{\frac{1}{2\tilde{\xi}_0} - \frac{\tilde{\xi}_0}{4}}{\frac{1}{2\tilde{\xi}_0^2} + \frac{1}{2\tilde{\xi}_0^3}}, \quad \frac{d\tilde{\eta}}{dE} = -\frac{dF_2}{\partial F_2} = \frac{-\frac{1}{2\tilde{\eta}_0} + \frac{\tilde{\eta}_0}{4}}{\frac{1}{2\tilde{\eta}_0^2} + \frac{1}{2\tilde{\eta}_0^3}}. \quad (4.7)$$

Видно, что смещения точек перегиба графиков  $\chi_1(\xi)$  и  $\chi_2(\eta)$  одинаковы по величине и отличаются друг от друга только знаком, а потому уширение электронного облака при поляризации атома не происходит.

### Список литературы

1. Rohrlich F. Classical Charged Particles (Addison-Wesley, Mass. 1965) –731 p.
2. Stratton J. A. Electromagnetic Theory (N. Y., London, 1941) –658 p.
3. Jackson J. D. Classical Electrodynamics (John Wiley, 1999) –808 p.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля (М.: Наука, 1973) –504 с.
5. Abraham M, Becker R. The Classical Theory of Electricity and Magnetism (Hafner, N. Y.) .
6. Фейнман Р. et al. Фейнмановские лекции по физике **5** (М.: Мир, 1977) - 300с.
7. Ohanian H C. Physics (W. W. Norton, N. Y., 1985) 1012 p.
8. Halliday D, Resnick R. Physics. Part 2 (N.Y. Wiley, 1962) -780 p.
9. Савельев И В. Курс общей физики, том 2. – М.: Наука, 1970.- 431с.
10. Сивухин Д В. Общий курс физики, том III, часть 1. – М.: Наука, 1996.- 320с.
11. Тамм И Е. Основы теории электричества. – М.: Физматлит, 2003.- 616с.
12. Griffiths D J. Introduction to Electrodynamics. (N.J.: Prentice-Hall, 1999) p. 192.
13. Храпко Р И. Где спрятана энергия поляризации диэлектрика? (2006)  
<http://trudymai.ru/published.php?ID=34090>  
<https://www.mai.ru/upload/iblock/779/gde-spryatana-energiya-polyarizatsii-dielektrika.pdf>  
 См. также: Храпко Р И. Энергия поляризации диэлектрика  
<http://khrapkori.wmsite.ru/ftpgetfile.php?id=68&module=files> (загружено 1978 раз),  
 Khrapko R.I. Polarization energy of a dielectric  
<http://khrapkori.wmsite.ru/ftpgetfile.php?id=13&module=files> (602 downloads)
14. Храпко Р.И. Поляризация диэлектрика не меняет форму молекул (2009)  
<http://mai.ru/publications/index.php?ID=8927>  
<https://www.mai.ru/upload/iblock/01d/polyarizatsiya-dielektrika-ne-menyaet-formu-molekul.pdf>
15. Ландау Л, Лифшиц Е. Квантовая механика. – М.: ОГИЗ, 1948.- 567с. § 37, § 73.
16. Корн Г, Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1984, 832с.

## Polarization does not change the shape of the molecules

R.I. Khrapko

The concept is criticized about quasi-elastic dipoles of dielectric which are being stretched when polarizing



**Российская академия наук**  
**Редакция журнала «Успехи физических наук»**  
119991 Москва, Ленинский проспект д. 53  
Тел. (499) 132-62-65. Тел./Факс. (499) 190-42-44, (499) 132-63-48.  
E-mail: [ufn@ufn.ru](mailto:ufn@ufn.ru)

---

№ 6096

*24 августа* 2017 г.

Р.И. Храпко

Уважаемый Радий Игоревич!

Спасибо Вам за интерес, проявленный к журналу УФН.

Как Вы знаете, наш журнал – обзорный, и тем самым он заметно отличается от специализированных журналов, публикующих оригинальные (приоритетные) научные результаты. О специфических требованиях УФН Вы можете прочитать в 1-м выпуске УФН за 2013 г. («От редакционной коллегии»). Там сказано, в частности, что редколлегия может отклонять даже вполне «доброкачественные» статьи, как не прошедшие по конкурсу.

Разумеется, требования редколлегии невозможно формализовать. Основанием для отклонения работы является экспертное мнение рецензентов и членов редколлегии.

В связи с этим редакция не может принять к рассмотрению Вашу статью «Поляризация диэлектрика не меняет форму его молекул».

Рекомендуем Вам направить Вашу рукопись в другой журнал.

С уважением,  
зам. главного редактора  
журнала «Успехи физических наук»

академик РАН



О.В. Руденко