

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

УДК 628.314.229

С. В. ШАПИРО, А. Г. САЕНКО

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОРГАНЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИОЛЕФИНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены проблемы создания систем электропитания плазмохимических технологических установок модификации поверхности полиолефиновых материалов. Подробно рассмотрено влияние резонансных процессов в высоковольтном трансформаторе на характеристики трансформируемого импульса. Уделено внимание парарезонансным процессам в системе «исполнительный орган–нелинейная емкостная нагрузка». *Плазмохимические технологии; исполнительный орган; ультразвуковой трансформатор; парарезонансные процессы*

ВВЕДЕНИЕ

В последние 15–20 лет начался интенсивный процесс проникновения плазменных технологических процессов в технологию легкой и текстильной промышленности. Основу этого направления составляет модифицирование поверхностных свойств полимерных (пленочных или тканых) материалов путем обработки в плазме травящих или полимеризующих газов [1]. Получаемые разнообразные технологические эффекты чаще всего связаны с приданием поверхностям гидрофильных или гидрофобных свойств. Изменение свойств поверхности в химии называется активацией, а устройство или вещество, его осуществляющее, называется активатором. Для плазмохимической обработки используется высокочастотный, в частности ультразвуковой, высоковольтный разряд [2].

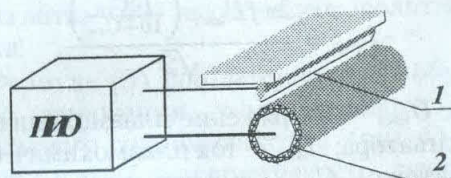


Рис. 1. Обобщенная схема плазмохимического активатора: ПИО — полупроводниковый исполнительный орган; 1 — высоковольтный электрод; 2 — изолированный электрод

В научно-исследовательской лаборатории кафедры физики Уфимского государственного института сервиса (УГИС) разработана ультразвуковая полупроводниковая установка плазмохимической модификации поверх-

ности полиолефиновых материалов — плазмохимический активатор. На рис. 1 дана обобщенная схема плазмохимического активатора.

Полупроводниковый исполнительный орган (ПИО) представляет собой ультразвуковой высоковольтный источник питания, состоящий из полумостового инвертора на транзисторах MOSFET, управляемого высоковольтным драйвером, ультразвукового высоковольтного трансформатора (25 кГц, 7,5 кВ). Высоковольтный электрод выполнен из нержавеющей стали. Низковольтный электрод представляет собой вращающийся изолированный вал технологической установки. Обработываемый материал проходит через разрядный промежуток.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ АКТИВАТОРА

Электрическое поле в разрядном промежутке плазмохимического активатора при различных стадиях барьерного разряда описывается методом зеркальных отображений (рис. 2, где $\tau = q/l$ — линейная плотность заряда высоковольтного электрода; $-\tau$ — линейная плотность зеркально отображенного заряда; x, y — координаты точки A ; $R1$ — радиус низковольтного электрода с диэлектрическим барьером; $R2$ — расстояние между центрами электродов; $R3 = R1^2/R2$; $R4, R5$ — проекции на ось y расстояний от зарядов до точки A , $R4 = R2 - y$, $R5 = y - R3$; E — вектор напряженности электрического поля в разрядном промежутке; E_τ ,

$E_{-\tau}$ — векторы напряженности от зарядов τ и $-\tau$; $E_{\tau x}, E_{-\tau x}, E_{\tau y}, E_{-\tau y}$ — проекции векторов напряженности $E_{\tau}, E_{-\tau}$ на соответствующие оси). С использованием метода зеркальных изображений выведено уравнение (1) для расчета напряженности поля в произвольной точке.

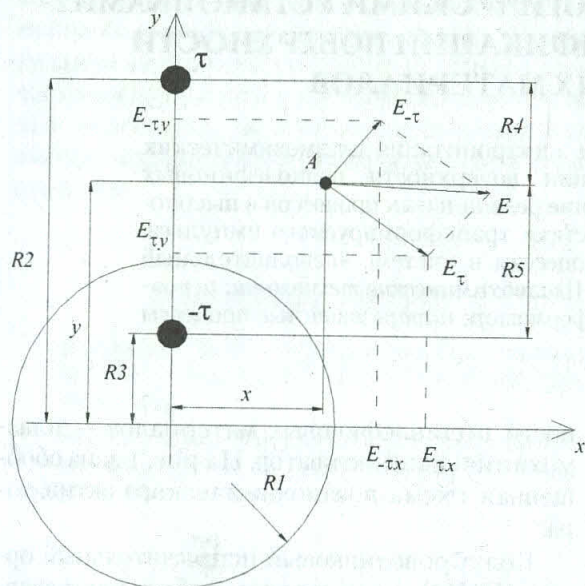


Рис. 2. Определение напряженности в произвольной точке разрядного промежутка активатора

Результирующий вектор напряженности электрического поля получен путем геометрического сложения двух векторов $E_{\tau}, E_{-\tau}$:

$$E = E_{\tau} + E_{-\tau} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \times \left[\sqrt{\left(\frac{x}{(x)^2 + (R_2 - y)^2}\right)^2 + \left(\frac{R_2 - y}{(x)^2 + (R_2 - y)^2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{x}{(x)^2 + (y - R_3)^2}\right)^2 + \left(\frac{y - R_3}{(x)^2 + (y - R_3)^2}\right)^2} \right] \quad (1)$$

Переменное электрическое поле, создаваемое концентратором силовых линий, является симметричным относительно цилиндрической поверхности. Специфической особенностью такого поля является возникновение зоны встречно-ионизированного газа на изолированном электроде (рис. 3), которая непосредственно участвует в обработке поверхности полиолефинового материала. Исследование микродинамики на модели электриче-

ских полей в ультразвуковом диапазоне позволило установить:

- возникновение зоны встречно-ионизированного газа;
- наличие бегущего барьерного разряда, определяемого изотензионными полуцилиндрическими поверхностями.

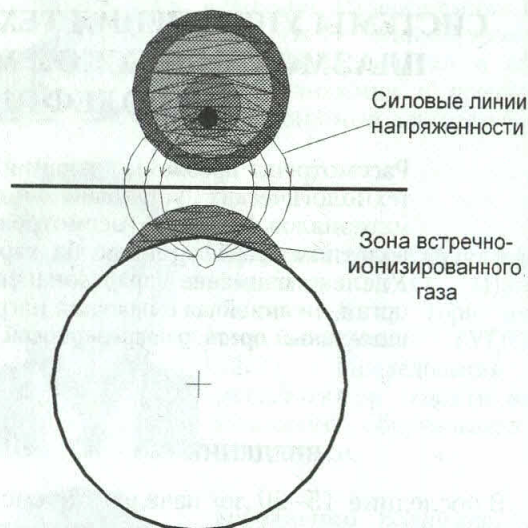


Рис. 3. Эффект возникновения зоны встречно-ионизированного газа

Моделирование выявило нелинейный характер зависимостей электрических параметров плазмохимического активатора. Зависимости напряжения и тока плазмохимического активатора от емкости газового промежутка определяются выражениями (2). Выражения (2) даны для случая, когда емкость диэлектрического барьера на изолированном электроде в десять раз больше емкости газового промежутка:

$$U_{\text{акт}} = \frac{\Delta\varphi \left(1 + \frac{C_{\text{гп}}}{10}\right)}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

$$I_{\text{акт}} = \frac{2\pi f U_{\text{акт}} \left(\frac{10C_{\text{гп}}}{10 + C_{\text{гп}}}\right)}{\sqrt{2}},$$

где $U_{\text{акт}}$ — напряжение плазмохимического активатора; $I_{\text{акт}}$ — ток плазмохимического активатора; $C_{\text{гп}}$ — емкость газового промежутка; f — частота питающего напряжения; $\Delta\varphi$ — разность потенциалов, $\Delta\varphi = \tau/2\pi\epsilon_0$.

2. РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Используемый в ПИО ультразвуковой высоковольтный трансформатор представляет собой сложную в электромагнитном отношении систему с дискретно-распределенными

между элементами его конструкции магнитными и электрическими связями. Магнитные связи между обмотками в целом, а также между их частями, которые разделены емкостными связями, учитываются коэффициентом взаимной индукции. Электрические связи учитываются емкостями между магнитной системой и первичной обмоткой, между витками обмоток, между первичной и вторичной обмотками, между вторичной обмоткой и магнитной системой. Распределенный характер носит также сопротивление обмоток, сопротивление потерь на вихревые токи, на гистерезис и в изоляции обмоток.

Составлена система разностных уравнений этой структуры и дано ее решение методом теории импульсных цепей. Суммарная магнитодвижущая сила, создаваемая токами в дискретно-распределенной системе электромагнитных связей в высоковольтной обмотке трансформатора, определяется по формуле

$$F_{\Sigma} = w_2 \left[C + \frac{2}{3} C_P \frac{(n_C - 1)(2n_p^2 - 3n_p + 1)}{n_C} + C_C \frac{(n_C - 1)^2}{n_C} \right] \frac{de_B}{dt} - \frac{1}{4} \mu_0 \frac{d_0 l_{cp}}{6h} w_2^2 \left[C \frac{n_C^3 + 6n_C^2 + 11n_C + 6}{n_C} + C_P \frac{(n_p - 1)(n_C^3 + 6n_C^2 + 11n_C + 6)}{n_C n_p} \right] \frac{d^2 i_2}{dt^2}, \quad (3)$$

где w_2 — число витков высоковольтной обмотки; n_C, n_p — число слоев и рядов высоковольтной обмотки; C, C_P, C_C — межвитковая, межслоевая, межсекционная емкости; d_0 — диаметр обмоточного провода; l_{cp} — средняя длина витка; h — высота высоковольтной обмотки.

Формуле (3) соответствует Г-П-образная схема замещения ультразвукового высоковольтного трансформатора (рис. 4), если учесть, что L_1 — индуктивность рассеяния первичной обмотки, рассчитываемая стандартными методами расчета индуктивностей; L_2 — индуктивность рассеяния вторичной обмотки:

$$L_2 = \frac{1}{4} \mu_0 \frac{d_0 l_{cp}}{6h} w_2^2;$$

C_1 — емкость первого резонансного контура:

$$C_1 = C + \frac{2}{3} C_P \frac{(n_C - 1)(2n_p^2 - 3n_p + 1)}{n_C} + C_C \frac{(n_C - 1)^2}{n_C};$$

C_2 — емкость второго резонансного контура:

$$C_2 = C \frac{n_C^3 + 6n_C^2 + 11n_C + 6}{n_C} + C_P \frac{(n_p - 1)(n_C^3 + 6n_C^2 + 11n_C + 6)}{n_C n_p}.$$

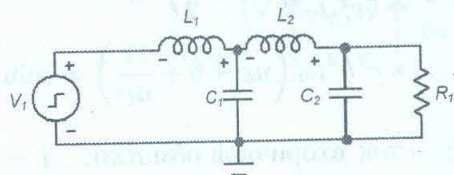


Рис. 4. Схема замещения ультразвукового трансформатора

Из схемы на рис. 4 получаем уточненную передаточную функцию ультразвукового высоковольтного трансформатора

$$U_2(p) = \frac{U_1(p)}{p^4 L_1 L_2 C_1 C_2 + p^2 (L_1 (C_1 + C_2) + L_2 C_2) + 1} \quad (4)$$

Так как знаменатель передаточной функции Г-П-образной схемы замещения ультразвукового высоковольтного трансформатора определяется биквадратным характеристическим уравнением, то искажения трансформируемого импульса представляют собой два наложенных друг на друга колебания [3].

$$f(t) = \frac{2 \cos \left(\omega_2 \sqrt{\frac{1+k_C+k_{\omega}^2 + \sqrt{(1+k_C+k_{\omega}^2)^2 - 4k_{\omega}^4}}{2}} \right) t}{\omega_2^4 \left(\begin{aligned} &(1+k_C+k_{\omega}^2)^2 - 4k_{\omega}^4 + \\ &+ (1+k_C+k_{\omega}^2) \times \\ &\times \sqrt{(1+k_C+k_{\omega}^2)^2 - 4k_{\omega}^4} \end{aligned} \right)} + \frac{2 \cos \left(\omega_2 \sqrt{\frac{1+k_C+k_{\omega}^2 - \sqrt{(1+k_C+k_{\omega}^2)^2 - 4k_{\omega}^4}}{2}} \right) t}{\omega_2^4 \left(\begin{aligned} &(1+k_C+k_{\omega}^2)^2 - 4k_{\omega}^4 + \\ &+ (1+k_C+k_{\omega}^2) \times \\ &\times \sqrt{(1+k_C+k_{\omega}^2)^2 - 4k_{\omega}^4} \end{aligned} \right)}, \quad (5)$$

где $k_C = C''/C'$ — коэффициент распределения собственной емкости трансформатора; $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ — собственная частота второго контура схемы замещения; $k_{\omega}^2 = \omega_1^2/\omega_2^2$ — коэффициент отношения собственных частот контуров схемы замещения.

Из формулы (5) следует, что искажение $f(t)$ будет минимальным при максимальном значении ω_2 . Поэтому в качестве целевой функции оптимизации конструктивных параметров трансформатора выбрана частота ω_2 .

Связь паразитных параметров высоковольтной обмотки ультразвукового высоковольтного трансформатора с его геометрическими размерами может быть представлена следующим соотношением:

$$L_3'' C_3'' = \frac{\pi^3 \alpha j^2 c}{6v_C^2 I_2} \left(D + \frac{c}{2} \right)^2 \times \\ \times c^2 h^2 k_0 \left(n_C + 6 + \frac{11}{n_C} \right) = \min, \quad (6)$$

где I_2 — ток вторичной обмотки; j — плотность тока в обмотке; k_0 — коэффициент заполнения окна магнитопровода медью; D — диаметр стержня магнитопровода; c — ширина окна магнитопровода; h — высота окна магнитопровода; v_C — скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике изоляционных материалов высоковольтной обмотки, $v_C = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon \epsilon_0}$.

Минимизация расходов активных материалов трансформатора с учетом (1) позволила получить следующие оптимальные соотношения (2) для расчета геометрических размеров магнитопровода трансформатора:

$$D = \sqrt[3]{\frac{1,16A}{hk_C k_0}}, \quad c = \sqrt[3]{\frac{1,25A}{hk_C k_0}}, \quad h = \sqrt[4]{\frac{0,34A}{(k_C k_0)^3}}, \quad (7)$$

где $A = P/(4fB_m j)$ — конструктивная постоянная, в которой P — расчетная мощность трансформатора; k_C — коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью; B_m — индукция насыщения.

3. ПАРАРЕЗОНАНСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПИО

Наличие паразитных параметров высоковольтной обмотки ультразвукового трансформатора и нелинейной емкостной нагрузки приводит к характерному для высокочастотных источников питания установок с барьерным разрядом явлению — комбинированному (многопараметрическому) резонансу.

На рис. 5 изображено суммарное напряжение $U_{\Pi}^i(I_{\text{акт}})$, имеющее N -образный характер. Поскольку емкость активатора с ростом напряжения $U_{\text{акт}}$ увеличивается, зависимость $U_{\text{акт}}(I_{\text{акт}})$ является нелинейной. Как видно,

эта зависимость носит N -образный характер. Благодаря этому в системе возникает резонансный триггерный эффект. Действительно, с ростом напряжения U_{Π}^i от нуля до значения U_{Π}^i (первый экстремум A на кривой $U_{\Pi}^i(I_{\text{акт}})$) ток $I_{\text{акт}}$ незначительно возрастает. При дальнейшем увеличении U_{Π}^i происходит скачок тока $I_{\text{акт}}$ от A до B . Далее с ростом U_{Π}^i продолжается плавный рост $I_{\text{акт}}$. Если начать уменьшать действующее значение выходного напряжения U_{Π}^i , то ток $I_{\text{акт}}$ будет плавно уменьшаться до значения, соответствующего точке C (второй экстремум кривой $U_{\Pi}^i(I_{\text{акт}})$), после чего снова происходит скачок, теперь в сторону уменьшения до точки D . Вместе с током $I_{\text{акт}}$ скачкообразно изменяется и напряжение активатора $U_{\text{акт}}$.

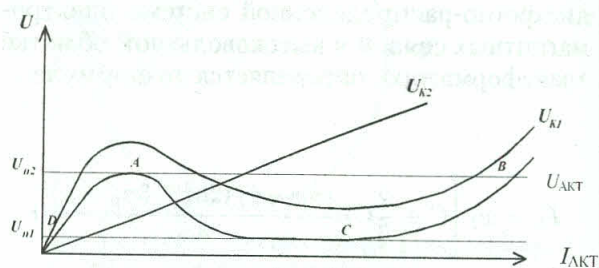


Рис. 5. Комбинированный резонанс

Комбинированный резонанс улучшает качество работы активатора — стабилизируется напряжение на активаторе, транзисторах инвертора и трансформаторе, а также токи в нем. Экспериментальные данные показывают, что при колебании входного напряжения в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения напряжение и ток активатора изменяются в пределах $\pm 2,5\%$. В таких же пределах меняется амплитуда тока силовых транзисторов.

Стабилизация напряжения на электродах при изменении сетевого напряжения осуществляется параметрически, за счет триггерного эффекта, описанного выше. Однако разнообразие обрабатываемых материалов требует эффективной обработки независимо от марки полиолефина. В связи с этим возникает проблема управления эффективностью обработки. В установке применено частотное регулирование. Частотное регулирование основано на резонансном характере нагрузки и достаточно глубоком диапазоне изменения тока, напряжения и мощности активатора при изменении частоты инвертора. Схема частотного управления плазмохимическим активатором реализована на базе высоковольтного полумостового драйвера фирмы International Rectifier IR2155.

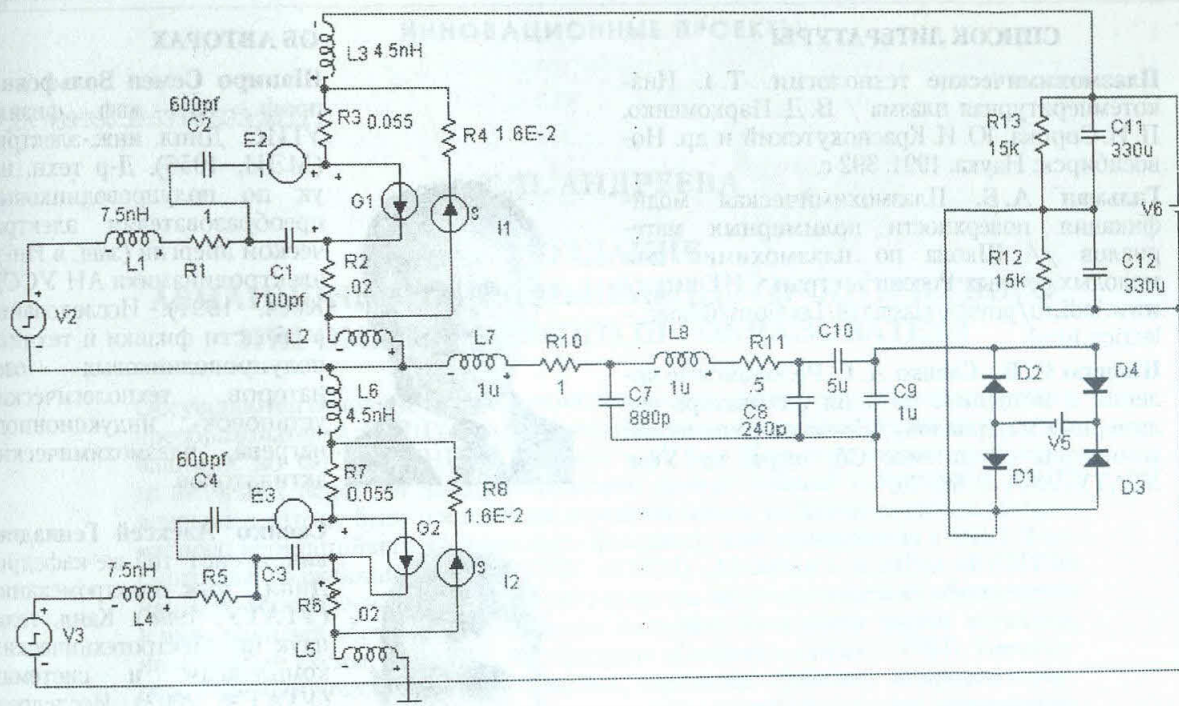


Рис. 6. Схема замещения ПИО с нагрузкой

Использование современного программного обеспечения позволяет исследовать электрические параметры электрических схем различной сложности. В работе для анализа процессов в плазмохимическом активаторе задействован программный продукт MicroCap V фирмы SpectrumSoftware. Исследовалась схема источника питания активатора с нагрузкой. Для адекватного описания разработанной схемы (рис. 6) была использована редко применяемая SPICE модель транзисторов MOSFET, трансформатор был описан разработанной схемой замещения (см. рис. 4).

Проведено исследование различных характеристик системы «ПИО — нелинейная емкостная нагрузка». Анализ полученных в результате моделирования характеристик позволил приступить к практической реализации установки.

В настоящее время изготовлены и апробированы в промышленных условиях модули ПИО плазмохимических активаторов с потребляемой мощностью 700 ВА со следующими массогабаритными показателями: масса 1,3 кг; габариты $0,25 \times 0,11 \times 0,1$ м³. Проведенные исследования поверхности полиолефиновых материалов подтвердили адекватность разработанных математических моделей реальным процессам в системе «ПИО —

плазмохимический активатор». Отклонения в действующих значениях токов и напряжений не превышают 3–7%.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель плазменных процессов при модификации поверхности полиолефиновых материалов, позволяющая определить оптимальную геометрию системы электродов и выявить возникновение зоны встречно-ионизированного газа на изолированном диэлектриком цилиндрическом электроде.

Выведены оптимальные соотношения в ультразвуковом высоковольтном трансформаторе, обеспечивающие минимальное искажение кривой напряжения.

Изучено явление стабилизации параметров полупроводникового исполнительного органа — триггерный эффект, вызванный комбинированным (многопараметрическим) резонансом.

Разработан и изготовлен опытно-промышленный образец плазмохимического активатора ПХА-700.

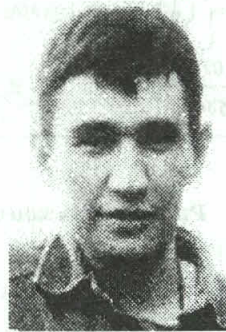
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плазмохимические** технологии. Т.4. Низкотемпературная плазма / В.Д. Пархоменко, П.И. Сорока, Ю.И. Краснокутский и др. Новосибирск: Наука, 1991. 392 с.
2. **Гильман А.Б.** Плазмохимическая модификация поверхности полимерных материалов // Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ http://www.indi.ru/private/plasma99/Lectures/Gilman_lecture.html.
3. **Шапиро С.В., Саенко А.Г.** Резонансные явления в источнике питания активатора полимерных материалов // Электротехнические комплексы и системы: Сб. науч. тр. Уфа: УГАТУ, 2001. С. 66–70.



ОБ АВТОРАХ

Шапиро Семен Вольфович, проф., зав. каф. физики УГИС. Дипл. инж.-электрик (МЭИ, 1956). Д-р техн. наук по полупроводниковым преобразователям электрической энергии (защ. в Ин-те электродинамики АН УССР, Киев, 1991). Исследования в области физики и техники полупроводниковых озонаторов, технологических установок индукционного нагрева, плазмохимических активаторов.



Саенко Алексей Геннадиевич, ассист. той же кафедры. Дипл. инж.-электромеханик (УГАТУ, 1998). Канд. техн. наук по электротехническим комплексам и системам (УГАТУ, 2002). Исследования в области источников питания для технологических установок плазмохимической модификации поверхности полимерных материалов.

Разнов

СЛОВО О НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

На вопрос, какая разница между человеком образованным и необразованным, он (Аристотель) ответил: «Как между живым и мертвым». *Диоген Лаэртский.*

В чем же счастье ученого? Я думаю в том, чтобы работать в одном синхронном ритме с понимающими тебя учениками и последователями. *К.И. Скрябин.*

И самому мудрейшему из умов всегда остается чему еще поучиться. *Сантяяна.*

Время движется, только когда человек думает или действует. *Инфельд.*

Никогда человек хорошо не знает своего предмета, если он ему никого не обучает. *П.Л. Капица.*

Крупнейшие открытия делались молодыми людьми. *И.К. Кикоин.*

Знать, чего ты хочешь достичь в жизни, — большое счастье. *Е.О. Патон.*

Ученики заставляют меня самого оставаться молодым.

Резерфорд со слов П.Л. Капицы.

[Слово о науке: Афоризмы. Изречения. Литературные цитаты. Кн. 2. М.: Знание, 1981.]