

Ю.Д. Филатов д-р.техн.наук., В.И. Сидорко д-р.техн.наук., С.В. Ковалев инж.,
А.Ю. Филатов инж.

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

ДИНАМИКА СТОЛКНОВЕНИЙ И РАССЕЯНИЯ ЧАСТИЦ ШЛАМА В ЗОНЕ КОНТАКТА ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ СТЕКЛА

Досліджено механізм утворення часток шламу в процесі полірування прецизійних поверхонь з оптичного скла за допомогою зв'язаних абразивів. Наведено аналіз їх взаємодії в контактній зоні, вивчено закономірності формоутворення оптичних поверхонь. У результаті дослідження динаміки зіткнень і розсіювання часток шламу вивчені залежності числа часток від кута розсіювання й координати контакту. Вивчено координатну залежність об'єму часток шламу й показано, що при поліруванні скла їх загальний об'єм становить приблизно 1/200 частину об'єму контактної зони. Методом Монте-Карло розраховані траєкторії руху часток, вивчена залежність їхнього числа від кута розсіювання й визначений ефективний диференціальний переріз розсіювання, що становить 0,8-3,9 Тб.

The formation mechanism of the slime particles during polishing with the help of the fixed abrasive pad of the precision surfaces of the optical glass was studied. The analysis of their cooperation in the contact area, as the result the dependencies of conformities of deep shaping of optical surfaces. The dependencies of the number of the particles on the diffusion angle and coordinates of the contact as a result of dynamics collision studies and diffusion of the slime particles were studied. The dependence on the coordinates of the volume of the slime particles is studied and it is shown that during polishing of the glass total number of particles concludes 1/200 part of the volume of the contact area. With the help of the Monte-Carlo method the trajectories of particles were calculated, the dependence of heir number on the diffusion angle and the efficient differential section were defined which are 0,8-3,9 Tb.

Постановка проблемы. Состояние проблемы контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали при полировании неметаллических материалов (НМ) характеризуется решением вопросов, связанных с изучением механизмов диспергирования частиц шлама и их распределения по размерам [1–2], исследованием закономерностей формообразования прецизионных поверхностей и управлением точностью их формы за счет оптимизации кинематических и режимных параметров процесса и выбора функционально-ориентированных конструкций и характеристик рабочего слоя инструмента [3–5], разработкой методов расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и компьютерного моделирования микро - и макрорельефа взаимодействующих поверхностей детали и инструмента [2–6]. В настоящее время изучено влияние технологических и конструктивных параметров, физико-химических свойств детали, инструмента и смазывающе-охлаждающей технологической среды на эффективность и качество обработки неметаллических материалов при полировании [3, 7–9]. Для процессов алмазного шлифования НМ на основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама [10], а также результатов исследования динамики их столкновений и рассеяния в контактной зоне определены параметры шероховатости плоских прецизионных поверхностей и их координатная зависимость, а также обосновано образование налета частиц шлама на рабочей поверхности инструмента [11–12]. Вместе с тем, процессы взаимодействия частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования не изучены, а причины

возникновения налета частиц шлама и частиц износа рабочего слоя инструмента на взаимодействующих поверхностях не выяснены окончательно. Только на основе изучения взаимодействия частиц шлама и износа в контактной зоне можно выяснить особенности формирования микрорельефа поверхностей обрабатываемой детали и рабочего слоя инструмента и на их основе наметить пути повышения качества обработанных поверхностей.

Закономерности взаимодействия частиц шлама в зоне контакта обрабатываемой детали и рабочего слоя инструмента. Концентрации частиц шлама в точке с координатой z (по нормали к обрабатываемой поверхности) при полировании определяется, исходя из физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама [10], в соответствии с формулой:

$$c_i(z, \tau) = n_{0i} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{erf}(\beta_i)} \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_i \tau}} \right) \right), \quad (1)$$

где: n_{0i} – число i -х частиц шлама на обрабатываемой поверхности, $\eta_i(\rho)$ – коэффициенты объемного износа, τ – время полирования, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – интеграл ошибок [13], $i = \overline{0, n-1}$ – номер группы частиц, n – число групп.

Коэффициенты объемного износа зависят от размеров d_i частиц шлама и времени τ_c их контакта с поверхностью инструмента в соответствии с формулой $\eta_i = d_i^2 / 4\beta_i^2 \tau_c$, а коэффициенты β_i являются решениями n трансцендентных уравнений [10]:

$$\frac{e^{-\beta_i^2}}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta_i)} = \frac{L_t}{n_{0i} S_i} \sqrt{\frac{\lambda T \tau_c}{p_a}}, \quad (2)$$

где p_a – номинальное давление прижима инструмента к детали; L_t – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; $T=300 \text{ K}$ – температура; S_i – площадь поверхности i -й частицы шлама [10].

При полировании плоских поверхностей деталей из стекла диаметром 60 мм инструментом диаметром $D_1=60$ мм, рабочий слой которого выполнен в виде 12 полировальных элементов Аквапол ЭП1 диаметром $d_f=10$ мм, на шлифовально-полировальном станке типа ШП номинальное давление прижима составляло $p_a = 0,05$ МПа, а частота вращения детали $\omega_1=20,9 \text{ с}^{-1}$ (200 об/мин). Параметры и характеристики стекла марки К8: плотность $\rho=2,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,95 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; энергия связи – 3,9 эВ (90 ккал/моль); энергия кластера – 5,3 эВ; количество фрагментов $\text{O}=\text{Si}=\text{O}$ в кластере $\xi=96$; значение константы Лифшица $\omega_{113}=9,2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$; параметр распределения частиц шлама по размерам (распределения Пуассона) – $\nu = 0,74$). Площадь поверхности частиц шлама определена, исходя из кластерной модели, по формуле $S_i=S_0(i+1)$, в которой $S_0=(\xi/2)L_x^2 + 8\xi^{1/2}L_xL_y$, а L_x и L_y – расстояния между соседними фрагментами на поверхности и между слоями фрагментов соответственно [14]. Наиболее вероятный размер частиц шлама $a_v=3,2 \text{ нм}$; концентрация частиц шлама – $2,2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, длина

пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности рабочего слоя инструмента $L_t=d_i$; скорость его относительного перемещения $u=\omega_1 D_1/4$; время контакта с поверхностью зерна полировального порошка (CeO_2 , $d_g=1$ мкм) $\tau_c=d_g/u$.

Решая численными методами n уравнений (2) и определяя коэффициенты объемного износа η_i , можно рассчитать концентрации i -х частиц шлама $c_i(z_0, \tau)$ на обрабатываемой поверхности ($z_0 = R_{\max}/2$ – расстояние от средней линии профиля до линии выступов, $R_{\max}=0,1$ мкм – максимальная высота неровностей профиля) и суммарную их концентрацию в зависимости от времени полирования (рис. 1). Величина концентрации $c(\tau)$ частиц шлама (на площади контакта инструмента и детали) в течение 10 мин полирования незначительно (до 1 %) возрастает, среднее значение концентрации частиц, образующихся в единицу времени, $c_m = 6,7 \cdot 10^{14}$.

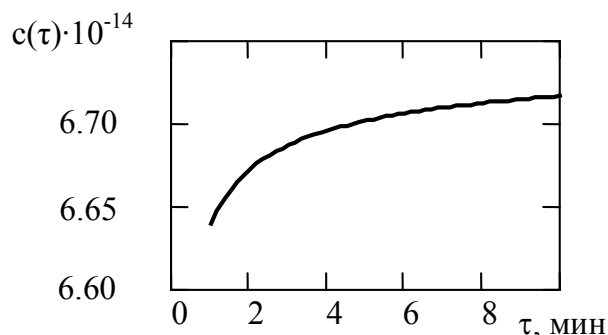


Рис. 1. Зависимость концентрации частиц шлама в контактной зоне от времени полирования ($z=R_{\max}/2$).

Производительность полирования стекла марки К8 при данных условиях, рассчитанная по величинам концентрации частиц шлама $c_i(z = R_{\max}, \tau = 1)$ с учетом их пуассоновского распределения по площадям поверхности, составляет $1,19 \cdot 10^{-11}$ м³/с и незначительно отличается (погрешность расчета 12,6 %) от экспериментального значения $1,06 \cdot 10^{-11}$ м³/с (линейный съем – 1,6 мг/мин. или 0,225 мкм/мин.).

Образовавшиеся за время одного оборота детали частицы шлама имеют суммарный объем $3,18 \cdot 10^{-12}$ м³. Объем частиц, расположенных на площади контакта инструмента и детали, составляет $1,06 \cdot 10^{-12}$ м³, а объем контактной зоны $v_z = S_k(l_0 - z_0) = 6,1 \cdot 10^{-10}$ м³ (l_0 – толщина зазора между поверхностями инструмента и детали). Объем зоны v_z приблизительно в 200 раз (193) больше объема всех образовавшихся за это время частиц шлама. Наиболее вероятный объем частицы шлама составляет $v_1 = 17,3 \cdot 10^{-27}$ м³, а их число $n_s = 6 \cdot 10^{13}$. На одну частицу шлама в зоне контакта приходится объем $v_z/n_s = 10^{-23}$ м³, а среднее расстояние между ними составляет $l \approx 21,5$ нм. Число таких ячеек вдоль оси z (число слоев) составляет $(l_0 - z_0) / l \approx 30$.

Исходя из проведенного анализа, можно определить координаты частиц шлама:

i — $z_i = z + d_i/2$, j — $z_j = z + d_j/2$ (d_i – размер i -ой частицы), их концентрацию в соответствии с формулой (1) за время 1 с на площади контакта $n_i(z) = c_i(z + \frac{d_i}{2}, \tau = 1)$ и

$n_j(z) = c_j(z + \frac{d_j}{2}, \tau = 1)$, а также зависимости суммарного числа частиц $N_i = \sum_i n_i$ от

координаты z (рис. 2) и усредненного по z числа частиц $N_{mi} = \frac{1}{l_0 - z_0} \int_0^{l_0} n_i(z) dz$ от их

размеров (рис. 3). Выборка i -х и j -х групп частиц для анализа процесса их взаимодействия правомочна, поскольку $\sum_i N_{mi} + \sum_j N_{mj} = 6,6 \cdot 10^{14}$ практически

совпадает с величиной c_m .

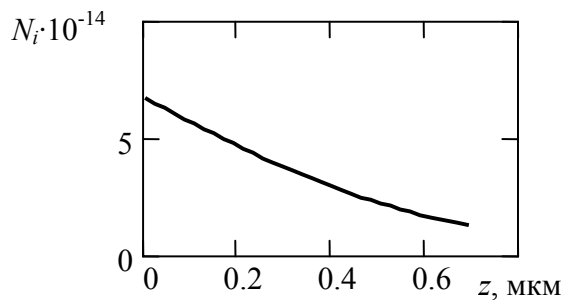


Рис. 2. Зависимость числа частиц шлама от координаты z

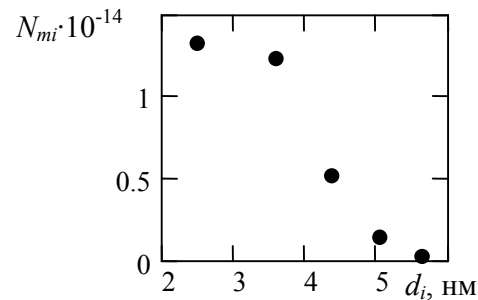


Рис. 3. Зависимость среднего числа i -х частиц шлама от их размеров

Рассмотрим взаимодействие частиц шлама в контактной зоне на основе известных закономерностей динамики молекулярных столкновений и классической теории рассеяния частиц [15] с учетом, что потенциал межмолекулярного взаимодействия частиц шлама, которые образуются при полировании и имеют размеры от 2,5 до 5,6 нанометров, можно выразить как

$$U_{ij}(x) = -\frac{\hbar\omega_{113}}{8\pi x} \cdot \frac{d_i d_j}{d_i + d_j}, \quad (3)$$

где \hbar – постоянная Планка, x – расстояние между частицами.

Определив прицельное расстояние $b_{ij} = \frac{1}{2}(d_i + d_j)$ и кинетическую энергию частицы $E_i = \frac{1}{2}\rho v_i u^2$ (v_i – объем i -й частицы), для двухчастичных столкновений угол θ_{ij} рассеяния можно выразить следующим образом:

$$\vartheta_{ij} = \pi - 2 \int_{R \min}^{l_0} \frac{b_{ij} dx}{x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{b_{ij}}{x}\right)^2 - \frac{U_{ij}(x)}{E_i}}}, \quad (4)$$

где $R \min = \frac{1}{2}(d_{i=n-1} + d_{j=n-1})$ – расстояние наибольшего сближения частиц.

С учетом распределения частиц шлама по размерам рассчитаны возможные значения угла рассеяния частиц (рис. 4, зона ограниченная кривыми 1 и 2), а также его

среднее $\Theta = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j \vartheta_{ij} = 104,3^\circ$, минимальное $\Theta_{\min} = 61^\circ$ и максимальное $\Theta_{\max} = 145^\circ$

значения.

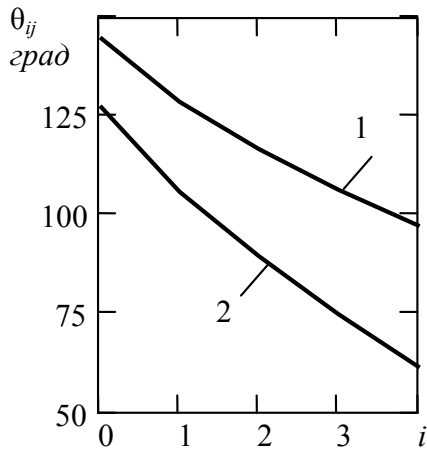


Рис. 4. Возможные значения угла рассеяния частиц шлама

рассеянных в интервале углов $[\Theta_{\min}; \Theta_{\max}]$ (рис. 6.) в плоскости, перпендикулярной обрабатываемой поверхности, тем больше, чем мельче размеры взаимодействующих частиц шлама. Эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц шлама σ_{ij} изменяется от 0,8 Тб (для $i = j = 0$) до 3,9 Тб (для $i = j = 4$).

Траектории движения частиц шлама рассчитаны в системе координат, связанной с технологической средой, заполняющей контактную зону, исходя из допущения, что частицы шлама влетают в неподвижную среду, в которой частицы шлама равномерно распределены в

Определяя эффективное дифференциальное сечение рассеяния частиц шлама $\sigma_{ij} = \pi(d_i + d_j)^2$, можно рассчитать число частиц, рассеянных в телесный угол $d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$ за единицу времени [15, 17] $dN = N_{mi} N_{mj} \sigma_{ij} d\Omega$. На рис. 5 представлена зависимость плотности распределения частиц шлама $\frac{dN}{d\Omega}$ от угла рассеяния, из которого следует, чем больше размеры частиц, тем меньше их рассеяние. Число частиц,

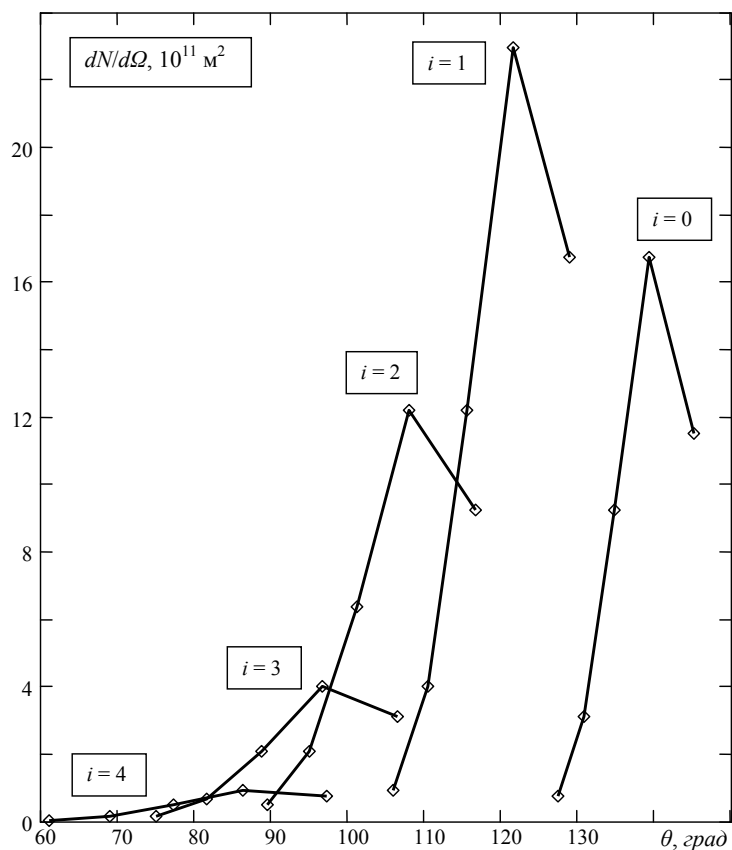


Рис. 5. Плотность распределение частиц шлама $\frac{dN}{d\Omega}$ в зависимости от угла рассеяния

ячейках объемом l^3 , с постоянной скоростью u . Методом Монте-Карло рассчитывались углы, на которые отклонялась i -я частица при рассеянии на j -ой частице. При помощи генератора чисел в соответствии с распределением Пуассона случайным образом выбирался номер j_m и соответственно определялся угол рассеяния θ_{ij} . Величина угла, на который отклонилась i -я частица шлама после m столкновений, определялась формулой а ее координаты в системе XOZ (ось OX совпадает со средней

$$\Delta_{im} = (m+1)\pi - \sum_{m=0}^m \vartheta_{ij_m}, \quad \text{линий профиля обрабатываемой поверхности):}$$

$$X_{im} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{ij}, \quad Z_{im} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{ij}.$$

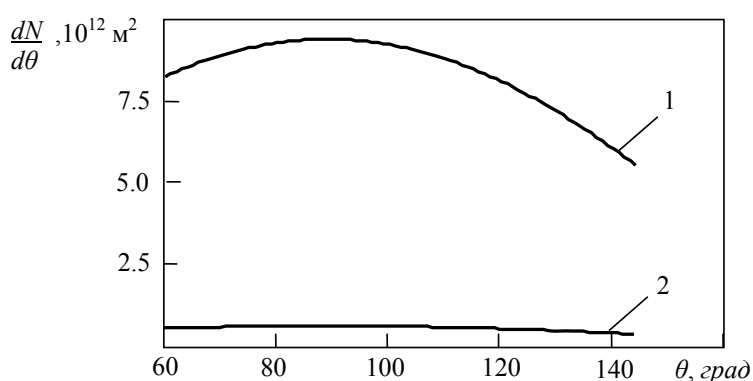


Рис. 6. Плотность распределение частиц шлама $\frac{dN}{d\vartheta}$ в зависимости от угла рассеяния: 1 – $i=0, j=0$, 2 – $i=0, j=4$.

В результате расчетов (для $z_i = z_0 + d_i / 2$) установлено, что траектории движения частиц шлама в технологической среде представляют собой кольца, наружный диаметр d_k которых составляет от 60–70 нм (для $i=0$) до 30–35 нм (для $j=4$), а ширина – порядка 10 нм, расположенные в непосредственной близости к обрабатываемой поверхности (на касательной $z = z_0$). На основе вышеуказанного можно заключить, что частицы шлама после отрыва от обрабатываемой поверхности «перекатываются» вблизи от нее, находясь в технологической среде в выделенных кольцевых каналах, что согласуется с классическими представлениями о процессе полирования. Рассеяние частиц в зоне контакта при $z \in [z_0 + d_k; l_0]$ происходит аналогично, в результате чего частицы шлама, двигаясь по кольцевым каналам, перемещаются в направлении оси OZ .

Выводы. В результате анализа взаимодействия частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали в процессе полирования на основе исследования динамики их столкновений и рассеяния показано, что их общий объем составляет приблизительно 1/200 часть объема контактной зоны, а эффективное дифференциальное сечение рассеяния составляет 0,8–3,9 Тб. Рассчитанные при помощи метода Монте-Карло траектории движения частиц шлама (без учета их взаимодействия с частицами износа инструмента) представляют собой кольцевые каналы. Двигаясь по этим каналам и

переходя из одного канала в другой, частицы шлама могут перемещаться в направлении рабочей поверхности инструмента и достигать ее. Именно этим может быть объяснено явление локализации частиц шлама и образования налета кремнезема на рабочей поверхности инструмента [16].

Список литературы

1. Филатов Ю.Д., Бурман Л.Л., Рогов В.В. Закономерности распределения диспергируемых частиц стекла по размерам // Сверхтв. материалы. – 1989. – № 5. – С. 53–55.
2. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтв. материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
3. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
4. Филатов Ю.Д. Обеспечение точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при обработке методом притира // Сверхтв. материалы. – 1991. – № 4. – С. 62–66.
5. Филатов Ю.Д. Определение оптимальной формы инструмента при полировании плоских оптических поверхностей / Трение и износ.– 12, N 3.– 1991.– С. 452–458.
6. Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P. New technology of precision polishing of glass optic. // Optical Engineering. –august 2001. – 40. – P. 1641–1645.
7. Komanduri R., Lucca D. A., Tani Y. Technological Advances in Fine Abrasive Processes / Annals of the CIRP.– 1997. – N 46/2. – P. 545–596.
8. ITIRM as a tool for qualifying polishing processes / Oliver W. Fahnle, Torsten Wons, Evelyn Koch, Sebastien Debruyne, Mark Meeder, Silvia M. Booij and Joseph J. M. Braat // Applied Optics.– 41, N 19/1, July 2002.– P. 4036–4038.
9. Сидорко В.І., Філатов Ю.Д. Ефективність фінішної алмазно-абразивної обробки природного та синтетичного каменю // Надтверді матеріали: створення та застосування: Зб. наук. праць (Серія «Матеріалознавство; Серія «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти»)/НАН України. ІНМ ім. В. М. Бакуля. – Київ, 2007.– С. 197–208.
10. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы.– 2005.– № 1. – С. 58–66.
11. Филатов А. Ю., Сидорко В.И., Филатов Ю.Д. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы.– 2007.– № 6. – С. 48–57.
12. Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu. Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // Abstracts of International Conference "Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008", Dresden, 23-25 January 2008. – P. 103.
13. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1985. – 383 с.
14. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия // Сверхтв. материалы. – 1994. – № 3. Ч. 1. – С. 40–43.
15. Эйринг Г., Лин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики: Пер. с англ.– М.: Мир, 1983. – 528 с.
16. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // Оптика и спектроскопия – 1993. – 74. – вып. 6 – С. 1229–1235.
17. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки: Навч. Посібник.–2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2002. – 392 с.