

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 544.023.221[678+661.682; 661.847.2]004.89
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-150-158>

Поступило в редакцию 06.11.2024
Received 06.11.2024

Д. В. Сапсальёв^{1,2}, Г. Б. Мельникова¹, Т. Н. Толстая¹, академик С. А. Чижик¹

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,
Минск, Республика Беларусь*

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА
ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛКАРБАЗОЛА
С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ**

Аннотация. Разработана методика формирования тонкопленочных наноструктурированных покрытий на основе поливинилкарбазола (ПВК) с наночастицами диоксида кремния и оксида цинка методом Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ). На основании анализа изотермы сжатия монослоя ПВК и данных атомно-силовой микроскопии о структурно-морфологических характеристиках ЛБ-пленок, сформированных способом горизонтального осаждения на поверхности гидрофилизированных кремниевых подложек при различных значениях поверхностного давления (π), установлено, что плотные покрытия на основе ПВК формируются при $\pi = 15$ мН/м. Оптимальное содержание наночастиц (на 1 моль полимера) в суспензиях для получения однородных наноструктурированных покрытий составляет до $24,44 \cdot 10^3$ моль (для SiO_2) и до $4,53 \cdot 10^3$ моль (для ZnO). Описан характер влияния введения наночастиц на структуру, смачиваемость и локальные механические характеристики формируемых композиционных покрытий. На основании рассчитанных значений модуля сжатия монослоев ПВК, ПВК– SiO_2 , ПВК– ZnO и комплекса полученных в ходе выполнения работы экспериментальных данных показано, что модуль сжатия полимерных и нанокomпозиционных монослоев Ленгмюра–Блоджетт может быть использован в качестве количественного критерия оценки плотности формируемых покрытий.

Ключевые слова: метод Ленгмюра–Блоджетт, поливинилкарбазол, тонкие нанокomпозиционные пленки, атомно-силовая микроскопия, неорганические наночастицы

Для цитирования. Особенности формирования, структура и свойства Ленгмюра–Блоджетт пленок поливинилкарбазола с неорганическими наночастицами / Д. В. Сапсальёв, Г. Б. Мельникова, Т. Н. Толстая, С. А. Чижик // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 2. – С. 150–158. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-150-158>

Dmitry V. Sapsaliou^{1,2}, Galina B. Melnikova¹, Tatyana N. Tolstaya¹, Academician Sergei A. Chizhik¹

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*
²*Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Minsk, Republic of Belarus*

**FEATURES OF FORMATION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF LANGMUIR–BLODGETT FILMS
OF POLY(VINYL CARBAZOLE) WITH INORGANIC NANOPARTICLES**

Abstract. A technique for the forming of thin-film nanostructured coatings based on poly(vinyl carbazole) (PVCz) with silicon dioxide and zinc oxide nanoparticles using the Langmuir–Blodgett (LB) method has been developed. Based on the analysis of the PVCz monolayer compression isotherm and atomic force microscopy data on the structural and morphological characteristics of LB films formed by horizontal deposition on the surface of hydrophilized silicon substrates at different values of surface pressure (π), it has been established that the densest PVCz-based coatings are formed at $\pi = 15$ mN/m. The optimal content of nanoparticles (per 1 mol of polymer) in suspensions for obtaining uniform nanostructured coatings is up to $24.44 \cdot 10^3$ mol (for SiO_2) and up to $4.53 \cdot 10^3$ mol (for ZnO). The effect of the introduction of nanoparticles on the structure, wettability and local mechanical characteristics of the formed composite coatings is described. Based on the calculated values of the compression modulus of PVCz, PVCz– SiO_2 , PVCz– ZnO monolayers and a set of experimental data obtained during the

work, it is shown that the compression modulus of polymer and nanocomposite LB monolayers can be used as a quantitative criterion for assessing the density of the formed coatings.

Keywords: Langmuir–Blodgett method, poly(vinyl carbazole), thin nanocomposite films, atomic force microscopy, inorganic nanoparticles

For citation. Sapsaliou D. V., Melnikova G. B., Tolstaya T. N., Chizhik S. A. Features of formation, structure and properties of Langmuir–Blodgett films of poly(vinyl carbazole) with inorganic nanoparticles. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 2, pp. 150–158 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-150-158>

Введение. Наноконпозиционные материалы на основе высокомолекулярных соединений широко применяются в науке и технике, что обусловлено уникальным комплексом их свойств (электрических, магнитных, оптических и пр.) [1–3]. Исследования в области получения и определения перспектив практического использования полимер-неорганических наноконпозитов связаны, главным образом, с подбором соответствующих полимеров, оптимизацией условий получения материалов для минимизации агрегации нанонаполнителя и обеспечения наличия требуемых характеристик у формируемого композита (получение материалов с заранее заданными свойствами) [2; 4].

Для решения обозначенных задач необходим точный контроль структуры формируемых наноконпозитов, что возможно с использованием метода Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ). Данный метод обеспечивает высокую степень контроля толщины пленки формируемого материала и ее молекулярной организации, что не может быть достигнуто другими распространенными способами (спин-коатинг, полив, распыление и пр.) получения полимерных наноконпозитов [5]. Например, в [6] приводится методика получения наноконпозиционных пленок ЛБ состава полималеиновый моноэфир–наночастицы Fe_3O_4 (ПММЭ–нч Fe_3O_4) путем переноса комплексных монослоев ПММЭ–нч Fe_3O_4 в гидрозолевой субфазе наночастиц Fe_3O_4 на твердые подложки. Однородное распределение наночастиц в полимерной матрице подтверждено результатами просвечивающей электронной и атомно-силовой микроскопии. Получены высокоориентированные наноконпозиционные структуры полииндола с наночастицами Ag. Равномерное распределение наночастиц в полимерной матрице установлено микро- и макроскопическими методами анализа поверхности [7].

Следует отметить, что полимеры являются более сложными материалами для реализации технологии ЛБ по сравнению с классическими объектами – низкомолекулярными амфифилами. Исследователям при работе с высокомолекулярными соединениями необходимо учитывать разнообразие возможных свойств макромолекул (полидисперсность, жесткость цепи, растворимость в том или ином растворителе, поверхностная активность и пр.) [8]. Указанные обстоятельства, в совокупности с многообразием возможных составов полимер–нанонаполнитель, обуславливают отсутствие системности в представлении информации по покрытиям ЛБ на основе высокомолекулярных соединений.

В частности, для тонких пленок карбазолсодержащих полимеров показаны перспективы применения в электронике, оптике, фотовольтаике, сенсорике [9; 10] и т. д. Тем не менее, информация по данному направлению исследований представлена отдельными сообщениями, чем и обусловлена актуальность фундаментальных исследований.

Цель работы – разработка методики формирования тонкопленочных покрытий Ленгмюра–Блоджетт на основе поливинилкарбазола (ПВК) с наночастицами диоксида кремния и оксида цинка; изучение структуры, локальных механических и гидрофильных свойств сформированных покрытий.

Материалы и методы исследования. Формирование пленок ЛБ осуществляли способом горизонтального осаждения с использованием установки «Автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси) на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин (ориентация 111, размеры $1,5 \times 1,5$ см) [11].

Поверхностное давление формирования монослоев определяли на основании анализа изотерм «поверхностное давление – площадь на молекулу» (π – A -изотерм), регистрируемых при ско-

рости сжатия монослоя 0,4 мм/с. Модуль сжатия (k) монослоев ЛБ рассчитывали для линейных участков изотерм сжатия, соответствующих фазовому состоянию «твердый кристалл» ($\pi = 10\text{--}20$ мН/м), согласно формулам

$$\delta = -\frac{1}{A} \frac{dA}{d\pi},$$

$$k = \frac{1}{\delta},$$

где δ – сжимаемость монослоя, м/мН; k – модуль сжатия монослоя, мН/м; A – значение площади на молекулу начала анализируемого линейного участка изотермы сжатия, нм²; $d\pi$ – изменение поверхностного давления в пределах анализируемого линейного участка изотермы сжатия, мН/м; dA – изменение площади на молекулу в пределах анализируемого линейного участка изотермы сжатия, нм² [12; 13].

ЛБ-пленки ПВК (Sigma-Aldrich, $M = 1100000$) формировали из его раствора в хлороформе с концентрацией 0,75 мг/мл. С целью получения покрытий, обладающих более развитой поверхностью, в структуру полимерной матрицы вводили наночастицы диоксида кремния и оксида цинка. Для этого раствор ПВК ($c = 1,5$ мг/мл) смешивали с суспензиями наночастиц SiO₂ (Sigma-Aldrich, $d = 10\text{--}20$ нм) и ZnO (Sigma-Aldrich, $d < 100$ нм) различных концентраций в хлороформе, предварительно выдержанными в ультразвуковой ванне в течение 10 мин, в объемном соотношении 1 : 1, после чего повторяли процедуру обработки готовых суспензий ультразвуком в течение 5 мин. В результате были приготовлены рабочие суспензии для формирования ЛБ-покрытий, содержащие $6,11 \cdot 10^3$, $12,22 \cdot 10^3$, $24,44 \cdot 10^3$, $48,89 \cdot 10^3$, $73,33 \cdot 10^3$ моль SiO₂ и $1,13 \cdot 10^3$, $2,26 \cdot 10^3$, $4,53 \cdot 10^3$, $9,05 \cdot 10^3$, $18,11 \cdot 10^3$ моль ZnO из расчета на 1 моль полимера.

Структуру поверхности сформированных покрытий исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 с использованием кремниевых кантилеверов NSC 11 A (Mickromasch, Эстония), средняя жесткость, согласно паспорту производителя, 3 Н/м. Локальные значения модуля упругости рассчитывали на основании данных, полученных при снятии кривых «подвода–отвода» (по 20 кривых для каждого образца) кантилевера к поверхности образца в контактном режиме работы АСМ с использованием функции Spectroscopy in point («статическая силовая спектроскопия») по модели Джонсона–Кенделла–Робертса [14]. Толщину монослойного покрытия ПВК на кремниевой подложке определяли по профилю покрытия с искусственно созданным дефектом, образованным в результате увеличения нагрузки при сканировании области минимальной площади (≈ 400 нм²).

Гидрофильные свойства поверхности сформированных покрытий оценивали на установке DSA 100E (KRUS, Германия) измерением краевого угла смачивания по двум рабочим жидкостям – дистиллированной воде и диодметану (Acros Organics, США). Контактный угол определяли методом лежащей капли (построением касательной в трехфазной точке: жидкость–подложка–воздух). Значения дисперсионной (γ^d) и полярной (γ^p) составляющих удельной поверхностной энергии рассчитывали по модели Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьельбле [15].

Результаты и их обсуждение. Поверхностное давление выделения полимерных и наноконпозиционных ЛБ-покрытий определяли на основании анализа изотерм сжатия монослоев и данных АСМ о морфологических характеристиках пленок, сформированных на поверхности гидрофилизированных кремниевых подложек при различных π .

Установлено, что плотные пленки ПВК формируются на поверхности кремниевых пластин при величинах поверхностного давления от 10 мН/м, что соответствует началу участка изотермы сжатия, отвечающему фазовому состоянию монослоя «твердый кристалл». Наименьшим количеством дефектов характеризуются ЛБ-пленки ПВК, сформированные при $\pi = 15$ мН/м; толщина покрытия, оцененная по профилю искусственно созданного дефекта, составила 5,9 нм. Увеличение поверхностного давления до 20 мН/м сопровождается значительным ростом стандартного отклонения величин среднеарифметической (R_a) и среднеквадратичной (R_q) шероховатости покрытий ЛБ (область сканирования 5×5 мкм), что свидетельствует о начале реструктуризации пленки (рис. 1).

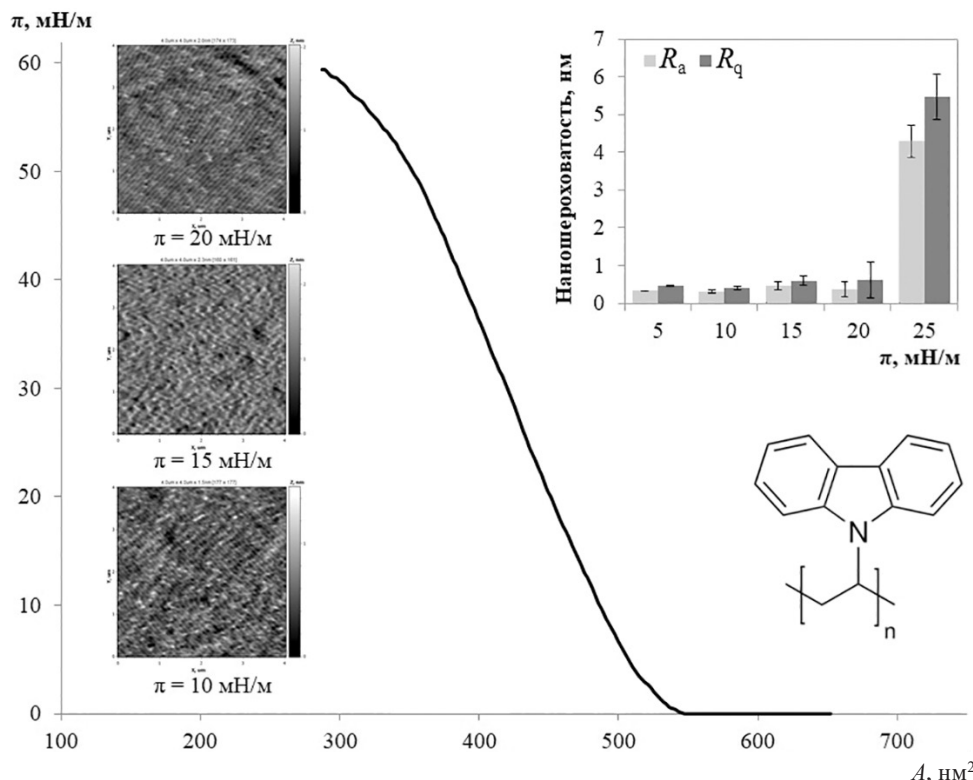


Рис. 1. Изотерма сжатия монослоя ПВК, а также данные АСМ о структуре и нанощероховатости полимерных покрытий, сформированных методом Ленгмюра–Блоджетт на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин, при различных значениях поверхностного давления

Fig. 1. Compression isotherm of a PVCz monolayer and AFM data on the structure and nanoroughness of polymer coatings formed by the Langmuir–Blodgett method on the surface of hydrophilized silicon wafers at different values of surface pressure

Полагаем, что подобное поведение ПВК на границе раздела субфаза–воздух обусловлено жесткостью его молекулярных цепей. При избыточном (свыше 20 мН/м) сжатии монослоя со стороны барьеров установки происходят локальные разрушения пленки ПВК с образованием неоднородных участков, наслаивающихся друг на друга. При дальнейшем увеличении π до 25 мН/м наблюдается многократный рост параметров нанощероховатости поверхности покрытий (рис. 1).

Таким образом, на основании анализа изотермы сжатия монослоя ПВК, данных АСМ о структуре покрытий, сформированных на кремниевых подложках при различных π , установлено, что плотные монослои ПВК с минимальным количеством дефектов формируются при $\pi = 15$ мН/м. Выделение композиционных пленок с неорганическими наночастицами осуществляли при указанном значении π .

Нанокмпозиционные пленки ПВК. Для оценки плотности нанокмпозиционных пленок Ленгмюра–Блоджетт проанализирована зависимость модуля сжатия монослоев на основе ПВК от содержания в их составе наночастиц диоксида кремния и оксида цинка. Полученные результаты приведены в таблице.

Согласно полученным значениям k , введение неорганических наночастиц приводит к увеличению модуля сжатия монослоев на основе ПВК, что свидетельствует об их равномерном распределении и заполнении собственных дефектов полимерной матрицы. Плотные ЛБ-слои формируются из суспензий со следующими содержаниями (моль на 1 моль ПВК) наночастиц: для SiO_2 – $6,11 \cdot 10^3$ и $12,22 \cdot 10^3$; для ZnO – $2,26 \cdot 10^3$ и $4,53 \cdot 10^3$.

Установленные соответствия согласуются с результатами АСМ-анализа ЛБ-покрытий, сформированных на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин. Так, однородные нанокмпозиционные ЛБ-пленки формируются при содержании наночастиц SiO_2 – до $24,44 \cdot 10^3$ моль; ZnO – до $4,53 \cdot 10^3$ моль (рис. 2, а–с; 3, а–с).

Зависимость модуля сжатия (k) монослоев ПВК–SiO₂ и ПВК–ZnO от содержания наночастиц в полимерной матрице (на участке $\pi = 10\text{--}20$ мН/м)

Dependence of the compression modulus (k) of PVCz–SiO₂ and PVCz–ZnO monolayers on the content of nanoparticles in the polymer matrix (in the range of $\pi = 10\text{--}20$ mN/m)

Монослой Monolayer	Содержание наночастиц (моль на 1 моль ПВК) Content of nanoparticles (mole per 1 mole PVC)	Значения k (мН/м) k values (mN/m)
ПВК	0	93,5
ПВК–SiO ₂	$6,11 \cdot 10^3$	138,2
	$12,22 \cdot 10^3$	112,5
	$24,44 \cdot 10^3$	104,4
	$48,89 \cdot 10^3$	93,6
	$73,33 \cdot 10^3$	75,9
ПВК–ZnO	$1,13 \cdot 10^3$	102,4
	$2,26 \cdot 10^3$	131,2
	$4,53 \cdot 10^3$	144,4
	$9,05 \cdot 10^3$	103,7
	$18,11 \cdot 10^3$	100,9

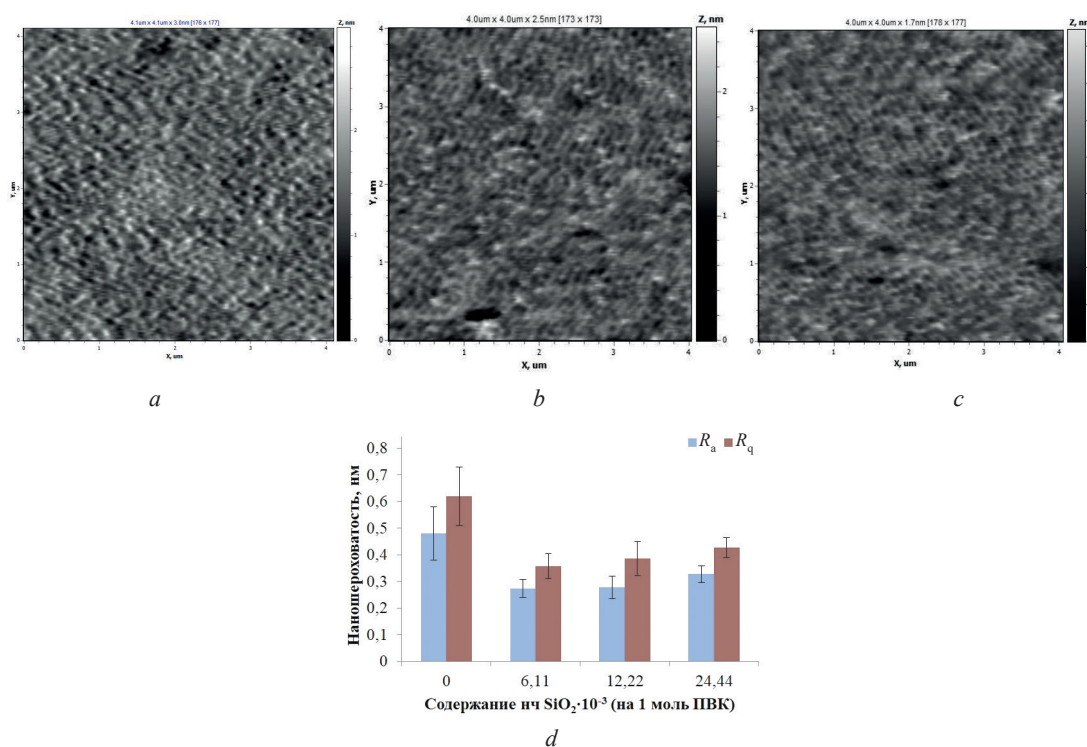


Рис. 2. Данные АСМ о структуре (а–с) и нанорoughности (d) ЛБ-пленок ПВК–SiO₂, сформированных способом горизонтального осаждения, на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин при $\pi = 15$ мН/м. Мольное содержание наночастиц SiO₂ (на 1 моль ПВК): а – $6,11 \cdot 10^3$; б – $12,22 \cdot 10^3$; в – $24,44 \cdot 10^3$

Fig. 2. AFM data on the structure (a–c) and nanoroughness (d) of PVCz–SiO₂ LB films formed by horizontal deposition on the surface of hydrophilized silicon wafers at $\pi = 15$ mN/m. Molar content of SiO₂ nanoparticles (per 1 mole of PVCz): a – $6.11 \cdot 10^3$; b – $12.22 \cdot 10^3$; c – $24.44 \cdot 10^3$

Превышение указанных содержаний наночастиц в рабочей суспензии для формирования покрытий ЛБ приводит к разупорядочиванию монослоя вследствие образования больших конгломератов наночастиц как сферической, так и неправильной формы, что сопровождается снижением значений модуля сжатия композиционных монослоев (таблица).

Уплотнение монослоев при введении в структуру матрицы ПВК наночастиц подтверждается также результатами оценки нанорoughности ЛБ-пленок. Нанокмозиты, для монослоев которых рассчитанные значения модуля сжатия превышают значения для исходного полимера,

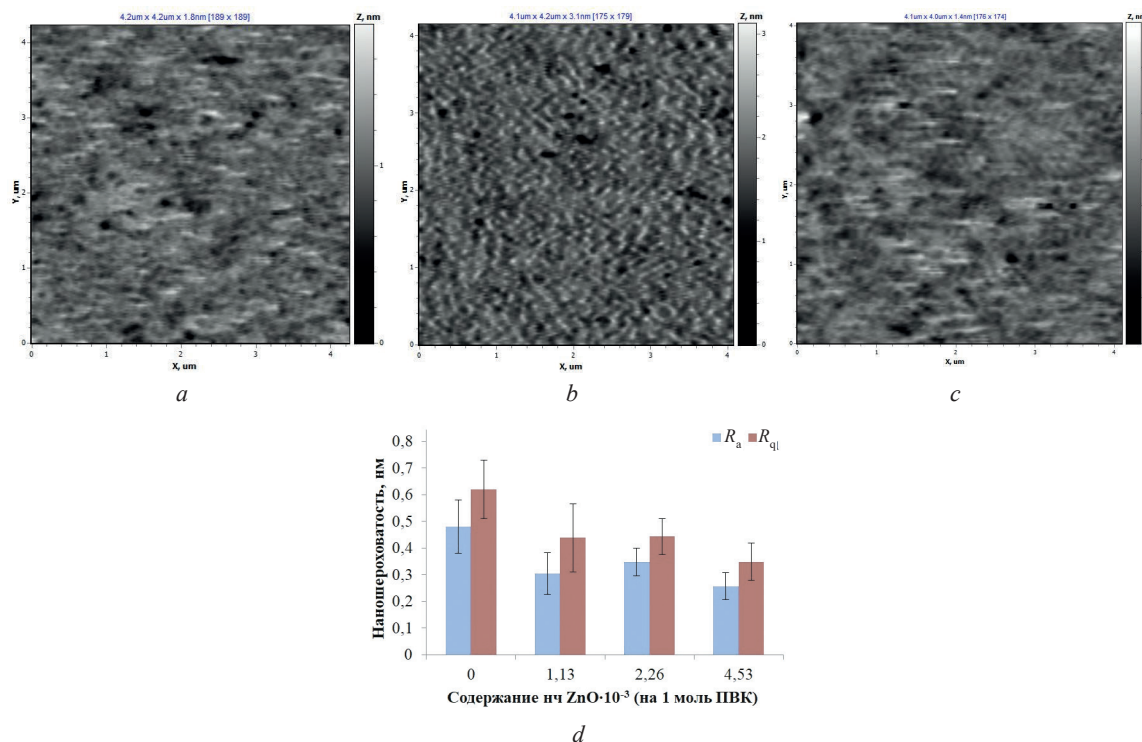


Рис. 3. Данные АСМ о структуре (а–с) и нанощероховатости (d) ЛБ-пленок ПВК–ZnO, сформированных способом горизонтального осаждения, на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин при $\pi = 15$ мН/м.

Мольное содержание наночастиц ZnO (на 1 моль ПВК): а – $1,13 \cdot 10^3$; б – $2,26 \cdot 10^3$; в – $4,53 \cdot 10^3$

Fig. 3. AFM data on the structure (a–c) and nanoroughness (d) of PVCz–ZnO LB films formed by horizontal deposition on the surface of hydrophilized silicon wafers at $\pi = 15$ mN/m. Molar content of ZnO nanoparticles (per 1 mole of PVCz): а – $1.13 \cdot 10^3$; б – $2.26 \cdot 10^3$; в – $4.53 \cdot 10^3$

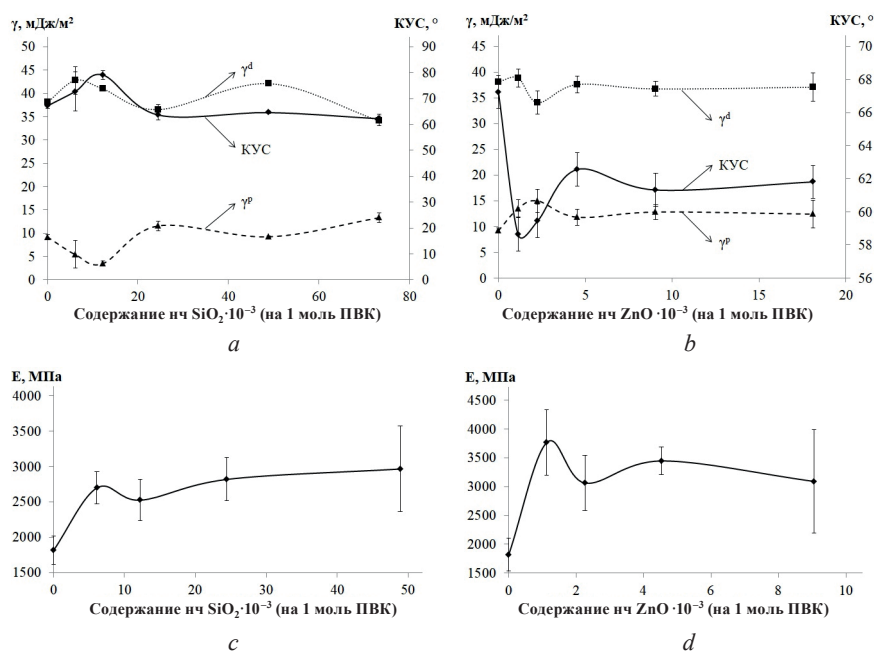


Рис. 4. Зависимости параметров смачиваемости (а, б) и значений локального модуля упругости (с, d) наноструктурированных покрытий ЛБ на основе ПВК от содержания неорганических наночастиц в полимерной матрице

Fig. 4. Dependences of wettability parameters (a, b) and local elastic modulus values (c, d) of nanostructured PVCz-based LB coatings on the content of inorganic nanoparticles in the polymer matrix

демонстрируют более низкие величины параметров R_a и R_q и их стандартного отклонения (таблица, рис. 2, *d*; 3, *d*).

Для композиционных покрытий ПВК–SiO₂ наблюдается рост значений краевого угла смачивания до содержания наночастиц в структуре пленки $12,22 \cdot 10^3$ моль (рис. 4, *a*), что обусловлено заполнением наночастицами межмакромолекулярного пространства ПВК и уплотнением структуры. Последующее увеличение содержания наночастиц SiO₂ в составе композитов приводит к повышению смачиваемости за счет роста полярной составляющей удельной поверхностной энергии, обусловленного агрегацией избыточных количеств модификатора. Конгломераты наночастиц могут также выступать на поверхность из-за «выдавливания» больших агрегатов жесткими молекулярными цепями полимера.

Модификация ПВК наночастицами ZnO приводит к увеличению смачиваемости ЛБ-покрытий для всех исследуемых соотношений за счет роста полярной составляющей удельной поверхностной энергии (рис. 4, *b*). Максимальное значение γ^p ($14,98$ мДж/м²) зафиксировано для пленки ПВК–ZnO ($2,26 \cdot 10^3$ моль).

Введение наночастиц в структуру матрицы ПВК приводит к росту значений локального модуля упругости E , что позволяет сделать вывод об армирующем эффекте нанонаполнителей. Отмечается схожий характер зависимости E от содержания наночастиц для составов ПВК–SiO₂ и ПВК–ZnO: повышение значений при введении небольших количеств модификатора и последующий выход на плато (рис. 4, *c*, *d*).

Заключение. Разработана методика формирования тонкопленочных наноструктурированных покрытий на основе ПВК с наночастицами диоксида кремния и оксида цинка методом Ленгмюра–Блоджетт: концентрация полимера в растворе (суспензии) – $0,75$ мг/мл; поверхностное давление выделения пленок – 15 мН/м; молярные содержания наночастиц в рабочих суспензиях – до $24,44 \cdot 10^3$ моль (для SiO₂) и до $4,53 \cdot 10^3$ моль (для ZnO).

На основании рассчитанных значений модуля сжатия монослоев ПВК, ПВК–SiO₂, ПВК–ZnO и комплекса экспериментальных данных о морфологических, гидрофильных и локальных механических свойствах ЛБ-пленок показано, что модуль сжатия полимерных и нанокомпозиционных монослоев Ленгмюра–Блоджетт может быть использован в качестве количественного критерия оценки плотности формируемых покрытий.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

Acknowledgements. The investigation was performed within the state program of scientific research for 2021–2025 “Energy and nuclear processes and technologies”, subprogram “Energy processes and technologies” (assignment 2.25).

Список использованных источников

1. A Comprehensive review on polymer nanocomposites; classification, properties and potential applications / A. Khan, S. Iqbal, M. Khan [et al.] // Journal of Nanoscope. – 2023. – Vol. 4, N 1. – P. 45–74. <https://doi.org/10.52700/jn.v4i1.88>
2. Ganesan, V. Some issues in polymer nanocomposites: Theoretical and modeling opportunities for polymer physics / V. Ganesan // Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics. – 2008. – Vol. 46, N 24. – P. 2666–2671. <https://doi.org/10.1002/polb.21587>
3. Hanemann, T. Polymer-nanoparticle composites: from synthesis to modern applications / T. Hanemann, D. V. Szabó // Materials. – 2010. – Vol. 3, N 6. – P. 3468–3517. <https://doi.org/10.3390/ma3063468>
4. Martín-García, B. Block copolymer assisted self-assembly of nanoparticles into Langmuire–Blodgett films: Effect of polymer concentration / B. Martín-García, M. Mercedes Velázquez // Materials Chemistry and Physics. – 2013. – Vol. 141, N 1. – P. 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.05.017>
5. Conjugated polymers as Langmuir and Langmuir–Blodgett films: Challenges and applications in nanostructured devices / R. Da Rocha Rodrigues, R. L. C. G. da Silva, L. Caseli, L. O. Peres // Advances in Colloid and Interface Science. – 2020. – Vol. 285. – Art. 102277. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102277>
6. Structure and characterization of nanocomposite Langmuir–Blodgett films of poly(maleic monoester)/Fe₃O₄ nanoparticle complexes / D. K. Lee, Yo. S. Kang, Ch. S. Lee, P. Stroeve // Journal of Physical Chemistry B. – 2002. – Vol. 106, N 29. – P. 7267–7271. <https://doi.org/10.1021/jp014446t>
7. Synthesis of uniformly dispersed large area polymer/AgNPs thin film at air-liquid interface for electronic application / R. Mishra, R. K. Pandey, S. Jana [et al.] // Materials Today Communications. – 2020. – Vol. 24. – Art. 101191. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101191>

8. Phase transitions in polymer monolayers: Application of the Clapeyron equation to PEO in PPO–PEO Langmuir films / L. Deschênes, J. Lyklema, C. Danis, F. Saint-Germain // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2015. – Vol. 222. – P. 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.11.002>
9. Jun-Fu, Liu. Langmuir–Blodgett films of poly-*N*-vinylcarbazole prepared by radical polymerization method / Jun-Fu Liu, Zu-Hong Lu, Kong-Zhang Yang // *Thin Solid Films*. – 1998. – Vol. 322, N 1–2. – P. 308–313. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00942-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00942-5)
10. Room temperature operated ammonia gas sensor using polycarbazole Langmuir–Blodgett film / V. Saxena, S. Choudhury, S. C. Gadkari [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2005. – Vol. 107, N 1. – P. 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.10.011>
11. Тонкие композиционные пленки полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния / Д. В. Сапсалёв, Г. Б. Мельникова, В. А. Лапицкая [и др.] // *Журнал Белорусского государственного университета. Химия*. – 2021. – № 2. – С. 36–49. <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-2-36-49>
12. Исследование структурных и пьезоэлектрических свойств пленок ПВДФ, полученных методом Ленгмюра–Блоджетт / И. А. Горбачев, А. В. Смирнов, Е. С. Шамсутдинова [и др.] // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2021. – Т. 85, № 6. – С. 777–782.
13. A Langmuir–Schaefer approach for the synthesis of highly ordered organoclay thin films / L. M. Toma, R. Y. N. Gengler, E. B. Prinsen [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2010. – Vol. 12, N 38. – P. 12188–12197. <https://doi.org/10.1039/c0cp00286k>
14. Johnson, K. L. Surface energy and the contact of elastic solids / K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts // *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. – 1971. – Vol. 324, N 1558. – P. 301–313. <https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141>
15. Kaelble, D. H. Dispersion-polar surface tension properties of organic solids / D. H. Kaelble // *Journal of Adhesion*. – 1970. – Vol. 2, N 2. – P. 66–81. <https://doi.org/10.1080/0021846708544582>

References

1. Khan A., Iqbal S., Khan M., Iqbal F., Musaddiq S., Masoom W., Sarwar A. A comprehensive review on polymer nanocomposites; classification, properties and potential applications. *Journal of Nanoscope*, 2023, vol. 4, no. 1, pp. 45–74. <https://doi.org/10.52700/jn.v4i1.88>
2. Ganesan V. Some issues in polymer nanocomposites: Theoretical and modeling opportunities for polymer physics. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 2008, vol. 46, no. 24, pp. 2666–2671. <https://doi.org/10.1002/polb.21587>
3. Hanemann T., Szabó D. V. Polymer-nanoparticle composites: from synthesis to modern applications. *Materials*, 2010, vol. 3, no. 6, pp. 3468–3517. <https://doi.org/10.3390/ma3063468>
4. Martín-García B., Mercedes Velázquez M. Block copolymer assisted self-assembly of nanoparticles into Langmuir–Blodgett films: Effect of polymer concentration. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, vol. 141, no. 1, pp. 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.05.017>
5. Da Rocha Rodrigues R., Da Silva R. L. C. G., Caseli L., Péres L. O. Conjugated polymers as Langmuir and Langmuir–Blodgett films: Challenges and applications in nanostructured devices. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, vol. 285, art. 102277. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102277>
6. Lee D. K., Kang Y. S., Lee C. S., Stroeve P. Structure and characterization of nanocomposite Langmuir–Blodgett films of poly(maleic monoester)/Fe₃O₄ nanoparticle complexes. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, vol. 106, no. 29, pp. 7267–7271. <https://doi.org/10.1021/jp014446t>
7. Mishra R., Pandey R. K., Jana S., Upadhyay C., Prakash R. Synthesis of uniformly dispersed large area polymer/AgNPs thin film at air-liquid interface for electronic application. *Materials Today Communications*, 2020, vol. 24, art. 101191. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101191>
8. Deschênes L., Lyklema J., Danis C., Saint-Germain F. Phase transitions in polymer monolayers: Application of the Clapeyron equation to PEO in PPO–PEO Langmuir films. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 222, pp. 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.11.002>
9. Jun-Fu Liu, Zu-Hong Lu, Kong-Zhang Yang. Langmuir–Blodgett films of poly-*N*-vinylcarbazole prepared by radical polymerization method. *Thin Solid Films*, 1998, vol. 322, no. 1–2, pp. 308–313. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(97\)00942-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00942-5)
10. Saxena V., Choudhury S., Gadkari S. C., Gupta S. K., Yakhmi J. V. Room temperature operated ammonia gas sensor using polycarbazole Langmuir–Blodgett film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, vol. 107, no. 1, pp. 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.10.011>
11. Sapsaliou D. V., Melnikova G. B., Lapitskaya V. A., Tolstaya T. N., Kuznetsova T. A., Kotov D. A., Chizhik S. A. Thin composite polymethyl methacrylate films with silicon dioxide nanoparticles. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya = Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2021, no. 2, pp. 36–49 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-2-36-49>
12. Gorbachev I. A., Smirnov A. V., Shamsutdinova E. S., Kashin V. V., Anisimkin V. I., Kolesov V. V., Kuznetsova I. E., Yudin S. G. Studying the structural and piezoelectric properties of PVDF films obtained using Langmuir–Blodgett technology. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 603–607. <https://doi.org/10.3103/s1062873821060101>
13. Toma L. M., Gengler R. Y. N., Prinsen E. B., Gournis D., Rudolf P. A Langmuir–Schaefer approach for the synthesis of highly ordered organoclay thin films. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2010, vol. 12, no. 38, pp. 12188–12197. <https://doi.org/10.1039/c0cp00286k>

14. Johnson K. L., Kendall K., Roberts A. D. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 1971, vol. 324, no. 1558, pp. 301–313. <https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141>

15. Kaelble D. H. Dispersion-polar surface tension properties of organic solids. *Journal of Adhesion*, 1970, vol. 2, no. 2, pp. 66–81. <https://doi.org/10.1080/0021846708544582>

Информация об авторах

Сапсальёв Дмитрий Владимирович – мл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь); аспирант. Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка (ул. Советская, 18, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dsapsalev@list.ru.

Мельникова Галина Борисовна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: galachkax@gmail.com.

Толстая Татьяна Николаевна – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru.

Чижик Сергей Антонович – академик, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chizhik_sa@tut.by.

Information about the authors

Sapsaliou Dmitry V. – Junior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Postgraduate Student. Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank (18, Sovetskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dsapsalev@list.ru.

Melnikova Galina B. – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galachkax@gmail.com.

Tolstaya Tatyana N. – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru.

Chizhik Sergei A. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik_sa@tut.by.