06

Определение термодинамических параметров (давления и температуры) синтеза частиц CuO в минireакторах

© М.П. Данилаев,[1] С.В. Дробышев,[1] Н.В. Дорогов,[1] П.Н. Иваньшин,[1] В.А. Куклин,[1,2] Н.Е. Курлыков,[1] К.В. Файзуллин[1]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия
[2] Казанский федеральный университет, Казань, Россия
e-mail: danilaev@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2026 г.
В окончательной редакции 8 июня 2026 г.
Принято к публикации 15 июня 2026 г.

Один из эффективных подходов к решению проблем, связанных с агломерацией дисперсных частиц в полимере при формировании композиционных материалов, основан на их синтезе *in situ* непосредственно в полимерной матрице. В частности, использование пространственно ограниченных реакционных зон — минireакторов, изолированных от внешнего раствора полимера полимерной оболочкой, позволяет управлять условиями синтеза и ослабить влияние окружающей среды на синтез дисперсных частиц. Работа посвящена определению термодинамических параметров (температуры и давления), которые реализуются внутри таких минireакторов при синтезе частиц оксида меди (II) с использованием СВЧ нагрева. Экспериментально и теоретически установлено, что давление внутри минireактора составляет от 4 до 6 atm. Установлено, что увеличение давления и температуры внутри минireакторов приводит к уменьшению среднего размера синтезируемых частиц оксида меди.

Ключевые слова: раствор полиметилметакрилата в толуоле, метод *in situ* синтеза частиц, частицы оксида меди, минireакторы, СВЧ индуцированный синтез.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64182.74-26

Введение

Выбор технологии формирования дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДПКМ) требует обоснования подходов к решению, по крайней мере, двух проблем: агломерация дисперсных частиц наполнителя [1,2], а также обеспечение однородного распределения частиц в полимерной матрице [3]. Это обусловлено существенным влиянием этих факторов как на механические, так и на функциональные характеристики ДПКМ [4]. Эффективный подход к снижению агломерации дисперсных частиц наполнителя и достижению их однородного распределения в ДПКМ основан на синтезе этих частиц непосредственно в полимерной матрице в процессе формирования композита (метод *in situ*) [5,6]. Например, в работе [7] показано существенное снижение агрегации частиц оксида цинка при получении ДПКМ на основе полистирола. Это позволило повысить эффективность биоцидного эффекта такого материала при сохранении модуля Юнга.

При синтезе частиц наполнителя непосредственно в полимерной матрице методом *in situ* необходимо учитывать влияние параметров окружающей среды, а также дисперсность прекурсора на форму, структуру и агломерацию синтезируемых частиц [8,9]. Так, значение pH может существенно повлиять как на тип синтезируемых частиц, так и на их габитус [10,11]. Условия окружающей среды при синтезе частиц в полимере изменять не всегда возможно, что ограничивает получение их желаемых характеристик. Поэтому наиболее целесообразен синтез частиц в растворе полимера в минireакторах [12,13], условиями в которых можно управлять, а также ослабить влияние окружающей среды на процесс синтеза.

Широкое распространение в качестве частиц наполнителя ДПКМ получили оксиды (ZnO, CuO, MnO_2, TiO_2 и др.) [14,15]. Такие наполнители используются для повышения твердости полимерной матрицы в композиционных полимерных электролитах электрохимических элементов питания [16], стойкости ДПКМ к биодеструкции [17], стабильности диэлектрических характеристик полимерных электретов [18]. Синтез некоторых частиц оксидов (ZnO, CuO) в минireакторах осуществляют путем инициирования термической реакции разложения соответствующих прекурсоров (гидроксиды, сложные комплексы). Следует отметить, что форма и размеры образующихся частиц в результате инициирования термической реакции их синтеза, зависят в том числе от давления [19]. Это дает возможность управлять размерами частиц (в некотором диапазоне размеров) путем обеспечения определенного давления в минireакторах. Повышение давления внутри минireактора, представляющего собой, например, водную суспензию прекурсора, отделенную от внешней среды, например, раствора полимера, полимерной оболочкой, может до-

стигаться за счет целенаправленного их нагрева СВЧ полем [20], а также выбором химического состава прекурсора внутри минореактора.

Цель настоящей работы состоит в определении термодинамических параметров (давления и температуры), возникающего в минореакторах при синтезе частиц оксида меди II (CuO) из гидроксида меди в растворе полиметилметакрилата (ПММА) в толуоле.

1. Экспериментальная часть

1.1. Материалы и методы

Формирование дисперсных частиц оксида меди CuO из водной суспензии гидроксида меди $Cu(OH)_2$ проводили в минореакторах, размещенных в растворе ПММА ТУ 2216-055-55856863-2009 в толуоле (марка ХЧ ГОСТ 5789-78) по схеме, описанной в работе [20]. Реакцию экзотермического разложения гидроксида меди до оксида меди II:

$$CuO(OH)_2 \xrightarrow{T>50\,^\circ C} CuO+H_2O \qquad (1)$$

осуществляли избирательно, за счет нагрева минореакторов в СВЧ поле с частотой 2.45 GHz. Образующийся в результате нагрева водяной пар создает избыточное давление в минореакторах. Это может повлиять на процесс формирования частиц CuO и их некоторые характеристики. Нагрев реализовывали в резонансной камере СВЧ генератора, в которой размещали плоскодонную кювету из термостойкого полимера, нерастворимого в толуоле, с объемом раствора (50 ± 5) mL и навеской суспензии гидроксида меди (2.0 ± 0.2) g [20].

Следует отметить, что тангенс диэлектрических потерь на этой частоте для компонентов раствора — ПММА (0.05–0.1) [21], толуола (0.03–0.08) [22] и гидроксида меди ($\sim 0.01 - 0.06$) [20] — незначительный по сравнению с водой (0.17–0.2). Поэтому для реализации целенаправленного нагрева минореакторов использовали навеску гидроксида меди $(2.0 \pm 0.2\,\mathrm{g})$ насыщенную водой и дополнительно слабым водным раствором щелочи NaOH. Добавлением щелочи повышали тепловые потери при воздействии СВЧ поля и уменьшали время нагрева минореактора. Содержание щелочи в водной суспензии гидроксида меди контролировали косвенно, путем измерения проводимости измерителем импеданса (марка Е7-21) в процессе отделения гидроксида меди от продуктов реакции, образующихся при его получении. Также определяли pH-гидроксида меди после его получения pH-метром (марка Hanna Instruments HI98130). Гидроксид меди получали по методике, приведенной в работе [6]. Значения удельной проводимости навески гидроксида меди обеспечивали в пределах $5-7\,\Omega \cdot \mathrm{cm}$, что соответствует концентрации NaOH в водном растворе около 5% [23]. При этом значение pH составило $\sim 13.6 - 13.8$.

Следует отметить, что, хотя присутствие щелочи NaOH не влияет на результат реакции (1), но определяет морфологию синтезируемых частиц CuO. Результаты исследований, представленных в работе [24], показывают, что в присутствии 1M щелочи NaOH (около 4%) в гидроксиде меди формируются частицы CuO чешуйчатой морфологии. При этом размер частиц определяется в том числе степенью дисперсности гидроксида меди.

Нагревание в СВЧ поле приводило к росту давления паров воды внутри минореакторов, их подъему на поверхность раствора, и к последующему разрушению полимерной оболочки. Среднюю скорость (v) подъема минореактора со дна кюветы на поверхность раствора определяли в экспериментах: для минореактора с начальным радиусом порядка $r_0 \sim 1\,\mathrm{mm}$ значение этой скорости составляло $v \sim 10^{-2}\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$. В результате разрушения минореактора происходило смешение с раствором ПММА кристаллических частиц CuO, образовавшихся вследствие реакции термодеструкции гидроксида меди [20]. Переход гидроксида меди в оксид определяли визуально по измерению цвета навески с небесно-голубого на черный. Размер минореакторов постепенно уменьшался вследствие многократных разрушений. После разрушения минореактора, всплывшего на поверхность раствора, образуются несколько минореакторов меньших размеров, которые опускаются на дно кюветы и происходит частичный выброс частиц CuO, находящихся внутри начального минореактора.

1.2. Методы исследования

Определение размеров частиц оксида меди (II) осуществляли методами просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа Carl Zeiss AURIGA Cross Beam с ЭДВ Inca X-Max 80 mm^2. При измерении размеров частиц, находящихся в растворе ПММА в толуоле, концентрацию полимера уменьшали за счет добавления растворителя с одновременным диспергированием в ультразвуковой ванне. После чего полученную суспензию наносили на 3 mm медную сеточку с подложкой Formvar/Carbon (TedPella). Средние размеры дисперсных частиц определяли с использованием статистической обработки фотографий не менее чем по 1200 частицам в программном комплексе ImageJ по методике, использованной в работе [25].

Структуру частиц оксида меди контролировали методом рентгеновской спектроскопии с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000. Запись рентгеновских дифрактограмм происходило по схеме Брэгга–Брентано в диапазоне углов 2θ от 30° до 80° с шагом 0.02° и временем регистрации в каждой точке 1 s. Длина волны излучения $\mathrm{CuK}\alpha_1 = 1.5406$ Å. Перед проведением анализа частицы CuO, полученные в суспензии, отмывали от ПММА. Для этого разбавляли полученную суспензию толуолом и выдерживали в ультразвуковой ванне (мощность 50 W, частота 44 kHz)

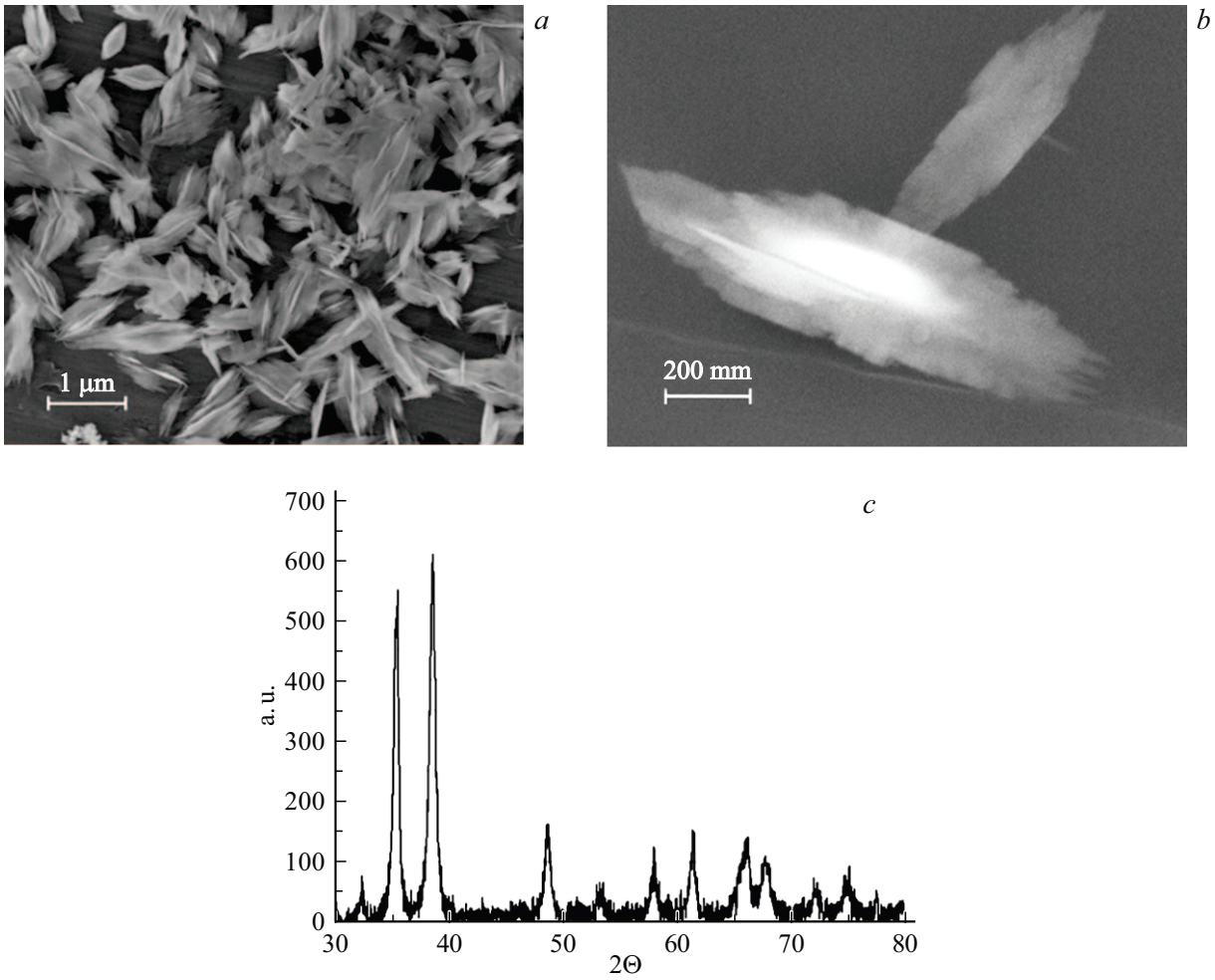


Рис. 1. Характеризация частиц оксида меди (II): *a* — частицы, полученные в герметичной кювете (СЭМ изображение), *b* — частицы, полученные в минireакторах (ТЕМ-изображение); *c* — типовая дифрактограмма частиц, полученных в минireакторах.

порядка 10 min. После седиментации частиц CuO собирали осадок и процедуру отмывки повторяли 5 раз.

Вязкость раствора ПММА в толуоле контролировали вискозиметром Брукфильда BGD 155/4SL (Intelligent Touch-screen Rotary Viscometer), отбирая пробы.

1.3. Результаты экспериментов

В экспериментах значение давления внутри минireакторов определяли косвенно — по результатам сравнения размеров частиц (рис. 1, *b*), полученных в растворе ПММА в толуоле, с частицами (рис. 1, *a*), синтезированными в герметичной кювете при различных давлениях. Объем герметичной кюветы составлял $\sim 13.5\,\mathrm{cm}^3$.

В герметичной кювете размещали такую же навеску водной суспензии гидроксида меди, насыщенную слабым раствором щелочи с той же удельной проводимостью, что и в минireакторах. Давление в герметичной кювете изменяли от 0.5 до 10 atm дискретно. Частицы получали при двух значениях температуры: $60\,^{\circ}\mathrm{C} \pm 2\,^{\circ}\mathrm{C}$ и $100\,^{\circ}\mathrm{C}$. Идентификацию частиц оксида меди (II), полученных обоими методами, проводили по их дифрактограммам (рис. 1, *c*) с использованием базы данных пакета Crystallographica. Таким образом было подготовлено по 5 типов частиц оксида меди при каждом значении температуры $60\,^{\circ}\mathrm{C} \pm 2\,^{\circ}\mathrm{C}$ и $100\,^{\circ}\mathrm{C}$. Каждый из типов частиц отдельно был получен соответственно при своем значении давления в герметичной кювете: 0.5, 1, 2, 5, 10 atm. Получали по 10 штук образцов каждого типа частиц для оценки СКО их размеров. Наблюдалась чешуйчатая морфология частиц во всех пяти типах образцов, что совпадает с результатами работы [24] и объясняется присутствием $\sim 1.32\,\mathrm{M}$ щелочи NaOH в гидроксиде меди.

Оценку размеров областей когерентного рассеяния проводили с использованием формулы Шеррера [26]. Средний размер кристаллитов составил $\sim 11.5\,\mathrm{nm}$. Таким образом, можно предположить, что образование частиц происходит в три основные стадии: образование зародышей кристаллизации; рост зародышей до размеров кристаллитов, объединение кристаллитов и формирование поликристаллических частиц оксида меди (II).

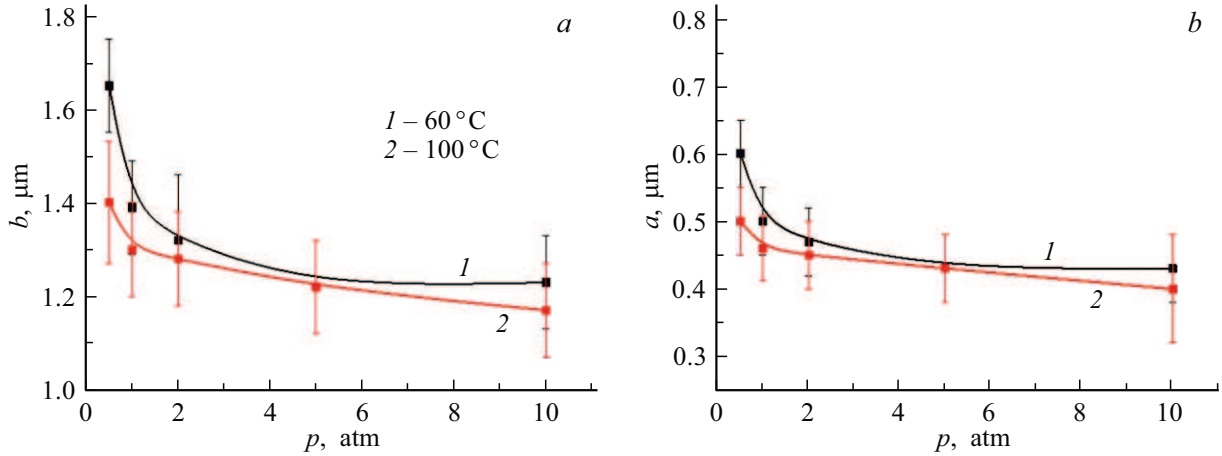


Рис. 2. Зависимость размеров частиц оксида меди (II), синтезированных в герметичной кювете, от давления при температурах 60 °C и 100 °C: a — малая ось эллипса; b — большая ось эллипса.

Зависимость размеров частиц от давления внутри герметичной кюветы приведены на рис. 2. При определении размеров частиц их форму аппроксимировали эллипсами (a — малая ось эллипса, b — большая ось эллипса), в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [27].

Уменьшение средних размеров частиц CuO, по всей видимости, обусловлено, в том числе, изменением подвижности молекул CuO при повышении температуры и давления. Температура в кювете, так же, как и в минireакторе, с одной стороны определяет скорость спонтанного зарождения множества мелких кристаллитов, а с другой — энергию их хаотичного теплового движения. Повышение этой энергии с ростом температуры, по всей видимости, приводит к снижению вероятности неупругих столкновений молекул CuO, и, следовательно, к снижению скорости роста кристаллов. Баланс этих двух процессов в условии неизменности количества вещества прекурсора определяет размер кристаллов. Снижение размеров кристаллов (рис. 2) наблюдается с ростом температуры, особенно в области низких давлений. Следует отметить, что рост крупных кристаллов на практике обеспечивают за счет стабильности или медленного изменения температуры при ее незначительном градиенте [28]. Эти требования не выполняются в минireакторе с учетом их интенсивного нагрева в СВЧ поле.

Повышение давления в объеме кюветы, так же, как и в объеме минireактора, обусловливает повышение скорости зарождения мелких кристаллов [29] и снижение скорость их роста [30]. Так, в работе [31] это объясняют изменением термодинамического равновесия системы под давлением при исследовании роста поликристаллов оксида алюминия. Следует отметить, что результаты экспериментов по влиянию внешнего давления (в диапазоне 23–29 MPa) на размеры поликристаллов оксида меди II, образующихся в результате термической реакции разложения гидроксида меди, обсуждались в работе [19]. Однако причины влияния давления на размеры поликристаллов авторы этой работе не приводят.

Среднее значение размеров частиц оксида меди II, полученных в минireакторах составляет $b \sim (1.20 \pm 0.05)\,\mu$m, $a \sim (0.43 \pm 0.02)\,\mu$m. С учетом разброса данных графиков (рис. 2) можно предположить, что давление в минireакторах при рассматриваемых условиях проведения эксперимента составляет не ниже 4 atm. При таком давлении температура суспензии внутри минireактора, в условиях эксперимента, видимо, будет близка к температуре кипения воды ($\sim 140\,^\circ$C) при данном давлении.

2. Теоретическая часть

Значение избыточного давления внутри минireактора оценивали при следующих допущениях.

1. Рассматривали модельную задачу всплытия капли воды со сплошной тонкой полимерной оболочкой из ПММА, отделяющей эту каплю от раствора ПММА в толуоле. Нагрев капли осуществляли избирательно СВЧ полем. Испарение воды внутри капли приводит к образованию пара, средняя плотность среды внутри минireактора уменьшается и капля начинает всплывать.

2. Избыточное давление паров воды в минireакторе определяли из условия равновесия действующих на него сил:

$$m\frac{d\mathrm{v}}{dt} = F_A - F_T - F_{\text{stokes}}. \qquad (2)$$

Здесь $F_T = m_0 g$ — сила тяжести, m_0 — начальная масса минireактора; $F_{\text{stokes}} = 6\pi r(t)\mu v$ — сила Стокса, $r(t)$ — радиус минireактора, μ — динамическая вязкость раствора ПММА в толуоле (определяли экспериментально, $\mu = 6 \cdot 10^{-3}$ Pa·s), v — средняя скорость движения (всплытия) минireактора (в расчетах принимали $\mathrm{v} \approx \text{const}$). $F_A = \rho_p g V(t)$ — сила Архимеда, ρ_p —

плотность раствора ПММА в толуоле (определяли экспериментально с использованием пикнометра), $V(t)$ — объем минireактора, изменение которого во времени обусловлено образованием паров воды и упругостью оболочки из ПММА:

$$V(t) = \frac{m_0 - m_1(t)}{\rho_0} = \frac{1}{k}\frac{m_1(t)}{\rho_1},$$

k — безразмерная величина, учитывающая долю пара, идущую на увеличение объема; ρ_0, ρ_1 — плотности воды и пара соответственно, значение плотности пара $\rho_1 = 1.9\,\mathrm{kg/m^3}$ выбирали соответственно температуре 140 °C [32]; $m_1(t)$ — масса пара, образующегося в результате нагрева минireактора за время t:

$$m_1(t) = \frac{Wt}{\lambda}\frac{V_0}{V_1},$$

V_0, V_1 — начальный объем минireактора и камеры СВЧ генератора соответственно, $V_1 = 0.5 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m^3}$, λ — удельная теплота парообразования воды $\lambda = 2.26 \cdot 10^6\,\mathrm{J{\cdot}kg^{-1}}$.

С учетом сделанных допущений, уравнение движения (2) в безразмерном виде (нормировали на $m_0 \cdot g$) преобразовали к виду:

$$\beta x(t) - \alpha\left[x(t)\right]^{\frac{1}{3}} - 1 = 0,$$

$$\alpha = 6\left[\frac{4\pi^4}{3g^3}\right]^{\frac{1}{3}}\frac{\mu v}{m_0}\rho_0; \quad \beta = \left[\frac{4\pi}{3}\right]\frac{\rho_p}{m_0}\rho_0^3, \qquad (3)$$

где $x(t)$ — объем минireактора в безразмерных единицах измерения. Численное решение уравнения (3) проводилось с использованием данных, полученных из экспериментов, и показало наличие только одного действительного корня:

$$x_0(t) \approx 1.57 = \frac{1}{V_0}\left[\frac{m_0 - m_1(t)}{\rho_0} - \frac{1}{k}\frac{m_1(t)}{\rho_1}\right]$$

откуда

$$k = \frac{\rho_0}{\rho_1}\left[\frac{m_1(t)}{1.57\rho_0 V_0 - m_0 + m_1(t)}\right].$$

В приближении уравнения Менделеева–Клайперона с учетом экспериментальных данных о времени всплытия минireактора около 5 s, оценочное значение давления (p) в минireакторе составляет $p \sim 6\,\mathrm{atm}$. Следует отметить, что давление пара внутри минireактора определяется в том числе модулем упругости (модулем Юнга) оболочки. В предположении того, что работа, совершаемая парами воды внутри минireактора, идет и на увеличение его объема с учетом упругости оболочки, модуль Юнга (YE) возможно записать [33]:

$$YE \leq \frac{3\rho_0 K}{2h}(1 - \nu),$$

где K — модуль объемного расширения, h — толщина оболочки ПММА на поверхности минireактора; ΔV_0 — величина, на которую увеличивается объем минireактора в конечный момент времени. Оценка величины модуля Юнга оболочки ПММА $YE \sim 5\,\mathrm{GPa}$ приведена для значений толщины $h \sim 1\,\mu\mathrm{m}$ [34], $\Delta V_0 = k \cdot V_0 \approx 2 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{m^3}$ и типовом значении коэффициента Пуассона для полимеров ($\upsilon \approx 0.3$). Полученное значение соответствует типовому значению модуля Юнга (1.3–5 GPa) для этого полимера [35]. Это подтверждает гипотезу формирования на поверхностях минireакторов сплошной полимерной оболочки ПММА, отделяющей минireакторы от раствора полимера.

Заключение

Таким образом, значения давления внутри минireактора, полученные расчетным и экспериментальным методами оказываются близкими: его величина составляет не менее $\sim 4 - 6\,\mathrm{atm}$. Оценка величины модуля Юнга полимерной оболочки минireактора $\sim 5\,\mathrm{GPa}$ свидетельствует, что объем минireакторов ограничивается сплошной полимерной оболочкой из ПММА, что обеспечивает рост давления в замкнутом объеме. Разрушение минireактора происходит после его всплытия на поверхность раствора по границе раствор–атмосфера, по всей видимости, в результате возникновения дополнительных напряжений в материале оболочки в данной области.

Предлагаемый подход к формированию суспензии с частицами оксида меди в растворах полимеров может представлять интерес при создании полимерных электролитов, в которых частицы CuO могут быть использованы для повышения механических характеристик. Причем агломерация дисперсных частиц приводит к возникновению локальных неоднородностей, и, как следствие, росту шумов и снижению ресурса соответствующих аккумуляторных батарей [36]. Это обусловливает актуальность поиска новых технологических решений, на снижение агломерации дисперсных частиц в полимерных электролитах.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Y. Zare, M.T. Munir, K.Y. Rhee, S.-J. Park. J. Mater. Res. Technol., **38**, 5649 (2025). DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.09.035

[2] E. Sharifzadeh, N. Azimi, A.H. Mohammadpour. J. Mater. Res. Technol., **35**, 858 (2025). DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.01.061

[3] İ. Şen, S. Tuna, M. Akkoyun Kurtlu. J. Cleaner Production, **480**, 144105 (2024). DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144105
[4] V. Kuklin, S. Karandashov, E. Bobina, S. Drobyshev, A. Smirnova, O. Morozov, M. Danilaev. Intern. J. Molecular Sci., **24**, 1 (2023). DOI: 10.3390/ijms24032515
[5] S. Porel, N. Venkatram, D.N. Rao, T.P. Radhakrishnan. J. Nanosci. Nanotechnol., **7** (6), 1887 (2007). DOI: 10.1166/jnn.2007.736
[6] E. Bobina, M. Danilaev, S.M.R.H. Hussein, S. Karandashov, V. Kuklin, I. Lounev, K. Faizullin. Karbala Intern. J. Modern Sci., **10**, 277 (2024). DOI: 10.33640/2405-609X.3357
[7] Y.R.C. Ureña, S.H.P. Bettini, P.R. Muñoz, L. Wittig, K. Rischka, P.N. Lisboa-Filho. Mater. Sci. Eng. **49**, 58 (2015). DOI: 10.1016/j.msec.2014.12.022
[8] J. Fawaz, V. Mittal. *Synthesis of Polymer Nanocomposites: Review of Various Techniques* (Wiley, USA, 2014), DOI: 10.1002/9783527670307.ch1
[9] M.M. Adnan, A.R.M. Dalod, M.H. Balci, J. Glaum, M.A. Einarsrud. Polymers, **10** (10), 1129 (2018). DOI: 10.3390/polym10101129
[10] K. Govender, D.S. Boyle, P.B. Kenwaya, P. O'Brien. J. Mater. Chem., **14** (16), 2575 (2004). DOI: 10.1039/B404784B
[11] Z. Singh. J. Appl. Sci., **19** (2), 148 (2019). DOI: 10.3923/jas.2019.148.155
[12] Ю.Д. Третьяков, А.В. Лукашин, А.А. Елисеев. Успехи химии, **73**, 974 (2004). DOI: 10.1070/RC2004v073n09ABEH000918
[13] L. Sun, Z. Fu, E. Ma, L. Li, Z. Liu, X. Guo. Langmuir, **39** (15), 5454 (2023). DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c00143
[14] A. Bouranta, I.V. Tudose, L. Georgescu, A. Karaiskou, N.R. Vrithias, Z. Viskadourakis, G. Kenanakis, E. Sfakaki, N. Mitrizakis, G. Strakantounas, N. Papandroulakis, C. Romanitan, C. Pachiu, O. Tutunaru, L. Barbu-Tudoran, M.P. Suchea, E. Koudoumas. Nanomaterials, **12** (6), 917 (2022). DOI: 10.3390/nano12060917
[15] L.M. Gradinaru, M. Barbalata Mandru, M. Drobota, M. Aflori, M. Butnaru, M. Spiridon, F. Doroftei, M. Aradoaei, R.C. Ciobanu, S. Vlad. Polymers, **13** (24), 4316 (2021). DOI: 10.3390/polym13244316
[16] N. Meng, X. Zhu, F. Lian. Particuology, **60**, 14 (2022). DOI: 10.1016/j.partic.2021.04.002
[17] M.P. Danilaev, T. Deberdeev, I.R. Vakhitov, V.A. Kuklin, S.A. Karandashov, G. Yakovleva, O.N. Il'inskaya. Polym. Sci., **17** (2), 397 (2024). DOI: 10.1134/S1995421224700667
[18] S.A. Shah, H. Ali, M.I. Inayat, E.E. Mahmoud, H. Al Garalleh, B. Ahmad. Scientific Reports, **14** (1), 28107 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-79477-x
[19] H. Liu, S. Wang, R. Zhuo, Y. Duan, J. Wang, Y. Li, J. Yang. Powder Technol., **444**, 119803 (2024). DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119803
[20] М.П. Данилаев, С.В. Дробышев, С.А. Карандашов, В.А. Куклин, К.А. Липатников, И.В. Лунев, К.В. Файзуллин. ЖТФ, **96** (4), 761 (2026).
[21] A. Tanwar, K.K. Gupta, P.J. Singh, Y.K. Vijay. Bull. Mater. Sci., **29** (4), 397 (2006).
[22] A.P. Gregory, R.N. Clarke. Measurement Sci. Technol., **18** (5), 1372 (2007).
[23] H. Al-Salih, Y. Abu-Lebdeh. J. Molecular Liquids, **422**, 127179 (2025). DOI: 10.1038/s41598-024-56552-x
[24] D.P. Singh, A.K. Ojha, O.N. Srivastava. J. Phys. Chem. C, **113** (9), 3409 (2009). DOI: 10.1021/jp804832g
[25] M.P. Danilaev, S.V. Drobyshev, M.A. Klabukov, V.A. Kuklin, D.A. Mironova. Nanotechnol Russia, **16**, 162 (2021). DOI: 10.1134/S263516762102004X
[26] L. Alexander. *X-ray diffraction methods in polymer science* (Wiley-Interscience, 1971), 582 p.
[27] P. Bowen. J. Dispersion Sci. Technol., **23** (5), 631 (2002). DOI: 10.1081/DIS-120015368
[28] S. Nishizawa. J. Crystal Growth, **649**, 127942 (2025). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2024.127942
[29] M. Outokesh, M. Hosseinpour, S.J. Ahmadi, T. Mousavand, S. Sadjadi, W. Soltanian. Industrial & Eng. Chem. Res., **50** (6), 3540 (2011). DOI: 10.1021/ie1017089
[30] M. Roble, D. Diaz-Droguett. Mater. Res. Express, **4** (8), 085502 (2017). DOI: 10.1088/2053-1591/aa8049
[31] X. Chen, W. Fan, W. Jiang, D. Lin, Z. Wang, S. Jiang. Metals, **12** (12), 2101 (2022). DOI: 10.3390/met12122101
[32] А.А. Александров, Б.А. Григорьев. *Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара* (Изд-во МЭИ, М., 2006), с. 168.
[33] Body Forces в сб.: *Solid Mechanics and Its Applications* (Springer, Dordrecht, 2004), 79–96. DOI: 10.1007/0-306-48395-5_7
[34] Е.С. Клюжин, А.А. Холодова, О.А. Сацкевич, И.А. Грицкова. Пластические массы, **7-8**, 23 (2019). DOI: 10.35164/0554-2901-2019-7-8-23-25
[35] А.В. Азин, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен, А.В. Васильев. Космические аппараты и технологии, **9** (1), 5 (2025). DOI: 10.26732/J.ST.2025.1.01
[36] B.H. Patil, B.R. Howell, J.W. Gallaway. J. Phys. Chem. C, **126** (36), 15104 (2022). DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c04870