

УДК 539.3
PACS 82.20.-w

Математическая модель реакции отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1

А. Л. Свистков^{a,b}, А. Ю. Елисеева^a, А. В. Кондюрин^{b,c}

^a Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1
email: anastasia_elis@mail.ru

^b Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

^c Школа физики университета Сиднея
NSW 2006, Австралия

Наноспутники – космические аппараты массой от 1 до 10 кг, которые летают, как правило, на низких околоземных орбитах. Главными их достоинствами являются простота и относительная дешевизна (как самих изделий, так и стоимости их вывода на орбиту). Такие летательные аппараты доступны для широкого круга пользователей и способны решать самые разнообразные технологические и научные задачи. В Массачусетском технологическом институте была разработана так называемая «надувная» антенна наноспутника, которая обеспечивает дальнюю связь – в 7 раз дальше, чем антенны современных наноспутников. Однако для работоспособности этой конструкции необходимы механизмы регулярной подачи газа в надувные элементы антенны, дополнительные емкости с газом или емкости с химическими элементами для его получения. В рамках данной работы предлагается иное решение проблемы, в частности, усовершенствовать надувную конструкцию антенны путем ее изготовления из препрега и отверждения в условиях открытого космоса. Данная технология позволяет получить высокий коэффициент упаковки во время транспортировки, обеспечивает возможность передачи более сильных сигналов на Землю. При этом целесообразно осуществлять горячее отверждение препрега. Для проведения вычислительных экспериментов необходимы определяющие уравнения процесса отверждения. В работе предложена математическая модель реакции отверждения препрега на основе перспективной реакционной смеси с эпоксидной смолой ЭД-20 и отвердителем ТЭАТ-1. Модель учитывает изменение концентраций фрагментов молекул реакционной смеси в процессе отверждения. Осуществлен переход от химической реакции смеси эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ТЭАТ-1 к описанию физико-механических свойств этой реакционной системы.

Ключевые слова: горячее отверждение; эпоксидная смола; отвердитель; реакционная смесь; химическая реакция

Поступила в редакцию 12.10.2018; принята к опубликованию 30.01.2019

Mathematical model for ED-20 rigidization with a rigidizer TEAT-1

A. L. Svistkov^{a,b}, A. Yu. Eliseeva^a, A. V. Kondyurin^{b,c}

^a Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Academician Korolev st., 1, 614013 Perm, email: anastasia_elis@mail.ru

^b Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

^c School of Physics, University of Sydney, NSW 2006, Australia

Nanosatellites are space vehicles with the weight of 1 – 10 kgs which typically fly at low earth orbits. They are easy to use and relatively cheap (both the vehicles themselves and the costs of their

orbital injection). These flying vehicles are accessible for many users and can solve a variety of technological and scientific tasks. The Massachusetts Institute of Technology developed the so called inflatable antenna of a nanosatellite with a communication range being 7 times longer than that of antennae of the modern nanosatellites. However, this construction requires the mechanisms to manually feed the gas into the inflatable elements of antennae, additional gas containers or containers with chemical elements to generate gas. The paper proposes another solution to the problem, that is, to improve an inflatable design of the antennae by manufacturing it from prepreg and its rigidization in the open space. This technology gives higher wrapping coefficient during transportation, gives an opportunity to transmit stronger signals to the Earth. In fact, it is more reasonable to hot-rigidize prepreg. Computing experiments require the appropriate equations for the process. The paper describes a mathematical model for prepreg rigidization on the basis of a promising reaction mixture consisting of epoxy resin ED-20 and a rigidizer TEAT-1. The model accounts for the changes in concentrations of reaction mixture molecule fragments during rigidization. The paper moves to the description of physical and mathematical features of reaction mixture.

Keywords: hot rigidization; epoxy resin; rigidizer; reaction mixture; chemical reaction

Received 12.10.2018; accepted 30.01.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-1-09-16

1. Введение

Композиционные материалы на тканевой основе, при создании которых в качестве связующего используют эпоксидные смолы, находят широкое применение в аэрокосмической промышленности. По нашему мнению, перспективным является применение таких композитов для конструирования изделий для спутников, вращающихся на околоземной орбите. На их основе можно создавать надувные элементы спутников (антенны, каркасы солнечных батарей и т.д.), которые после разворачивания и отверждения будут жесткими. Достоинствами таких элементов являются высокий коэффициент упаковки при выводе на орбиту, малая масса, простота и надежность приведения в рабочее состояние.

Антенны являются необходимой частью современных космических аппаратов. В зависимости от значения наноспутника технические требования к антенне могут различаться [1]. Например, для обеспечения надежной дальности связи с Землей необходимо использовать антенны больших размеров [2–4]. Однако недостаток свободного пространства космических аппаратов требует ограничения габаритов антенн. Решение данной проблемы находят в использовании надувных конструкций. В сложенном состоянии надувная антенна имеет наименьший размер и небольшую массу [3]. Недостатком этой конструкции является необходимость поддержания постоянного давления путем использования баллонов высокого давления, или порошка, выделяющего газ при снижении давления. Кроме того, любое повреждение антенны может привести к утечке газа [5]. Данную проблему решают путем изготовления антенны из

материала, который при высоких температурах или под влиянием солнечных лучей медленно отвердевает [6]. Например, компания Contraves разработала надувную антенну, изготавливаемую из материала Kevlar, пропитанного резиной [7]. Резина затвердевает в течение шести часов при температуре 110 С. После этого газ, необходимый для надувания антенны, сбрасывается.

В работе [8] предлагается использовать для изготовления надувной антенны наноспутника реакционную смесь, состоящую из эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя изо-МТГФА в качестве связующего компонента препрега. Данная технология предполагает развертывание антенны наноспутника в космосе и ее последовательное отверждение, происходящее за счет солнечного излучения. Однако новые эксперименты показали, что в условиях вакуума происходит сильное испарение отвердителя. Поэтому целью дальнейшего изучения стала слаболетучая реакционная смесь с эпоксидной смолой ЭД-20 и отвердителем ТЭАТ-1.

Чтобы провести компьютерные эксперименты с целью изучения процесса отверждения изделия на околоземной орбите, необходимо разработать математическую модель химической реакции горячего отверждения материала. К данному вопросу обращались авторы работ [8–10]. В работе [8] для построения математической модели были выделены группы атомов реагирующих компонентов, которые дают полную информацию о ходе химической реакции. Для каждой группы сформулированы свои кинетические уравнения. Авторами работы [9] была предложена кинетическая модель (система 10 обыкновенных дифференциальных уравнений), описывающая процесс полимеризации эпоксидной смолы в условиях открытого космоса и содержащая в качестве фазовых переменных 7

компонент активных амин групп и 3 компоненты эпоксидных групп. Обобщение этой модели, учитывающее диффузию реагирующего вещества, поперек слоя оболочки описано в работе [10].

Разработка математических моделей процесса отверждения эпоксидных олигомеров позволяет непосредственно перейти к описанию физико-механических свойств реакционной системы, таких как вязкость и модуль упругости [11,12].

Целью данной работы является разработка математической модели реакции отверждения реакционной смеси, учитывающей изменение концентраций фрагментов молекул реакционной смеси, которые дают полную информацию о ходе химической реакции, и позволяют осуществить переход к описанию физико-механических свойств материала.

2. Особенности моделирования реакции горячего отверждения

В качестве связующего компонента препрега предполагается использование реакционной смеси эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ТЭАТ-1 (триэтаноламинтитанат). Подобные связующие обладают высокими механическими характеристиками и традиционно используются при создании стеклопластиков и углепластиков [13]. Кроме этого, как показывают эксперименты, данная реакционная смесь имеет низкую летучесть компонентов в условиях вакуума.

Для вычислительного моделирования протекания химической реакции необходимо разработать соответствующую математическую модель, которая предлагается в данной работе. Молекула эпоксидной смолы марки ЭД-20 в своем составе имеет 2 эпоксидные группы. Ее структурная формула представлена на рис. 1, а.

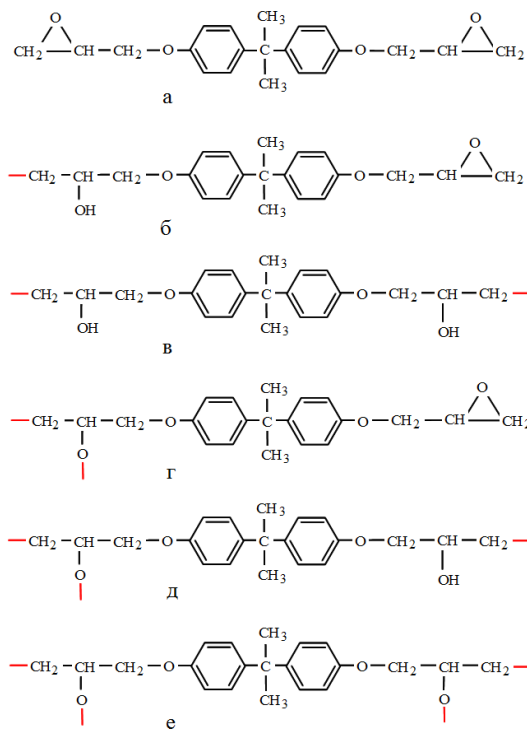


Рис. 1. Группы атомов основной массы молекул смолы, используемые для построения математической модели

Кроме того, в ЭД-20 в небольших количествах присутствуют молекулы, имеющие в своем составе гидроксильную группу OH, которая может вступать в реакцию с молекулой отвердителя (рис.2, а). Данные молекулы будем называть длинными, а молекулы ЭД-20, не имеющие в своем составе гидроксильных групп, – короткими.

Предложена следующая схема химической реакции отверждения реакционной смеси эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1. На

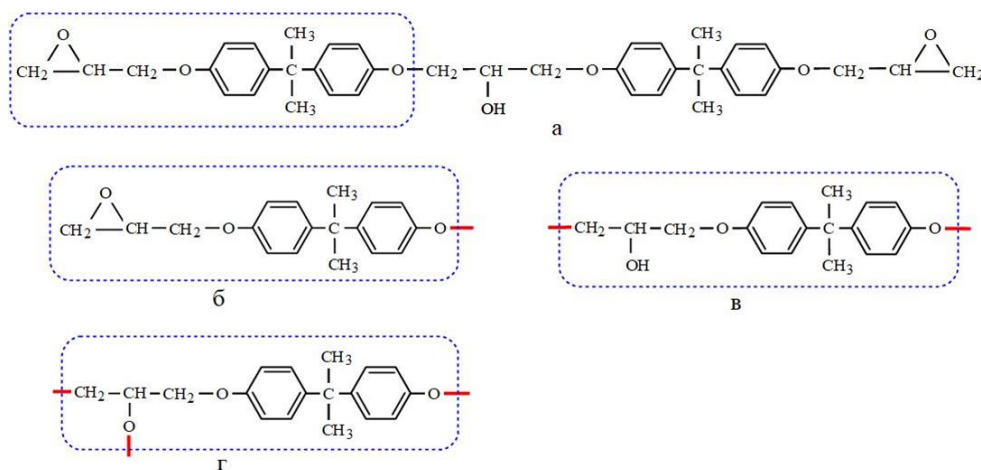


Рис. 2. Группы, которые могут образовать длинные эпоксидные молекулы. На рис. (а) показана химическая формула исходной длинной молекулы эпоксидной смолы. Пунктиром выделены группы, которые отличаются от групп коротких эпоксидных молекул. Для моделирования необходимо учитывать группы: с одной химической связью (б); с двумя связями (в); с тремя связями (г)

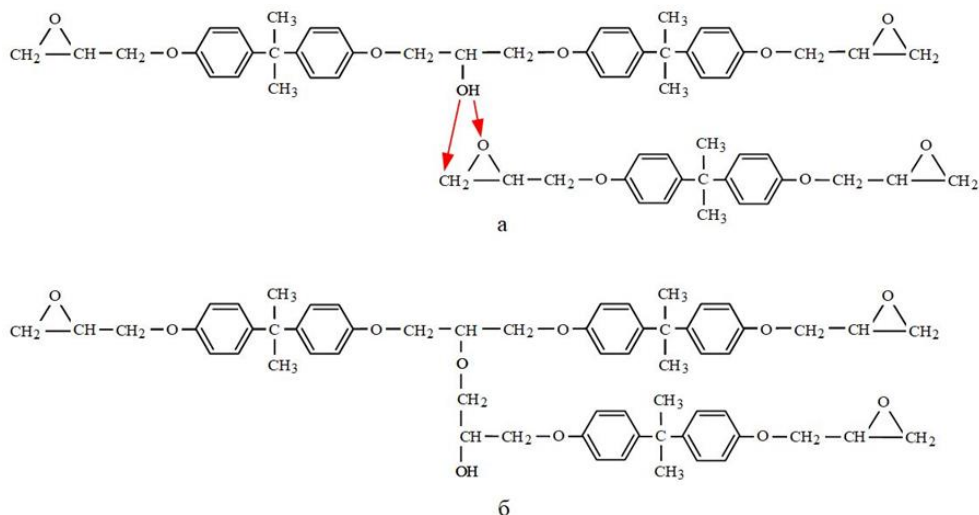


Рис. 3. Химические реакции, инициируемые компонентами реакционной смеси: а – взаимодействие карбоксильной и эпoxidной групп; б – взаимодействие гидроксильной группы с ангидридным кольцом

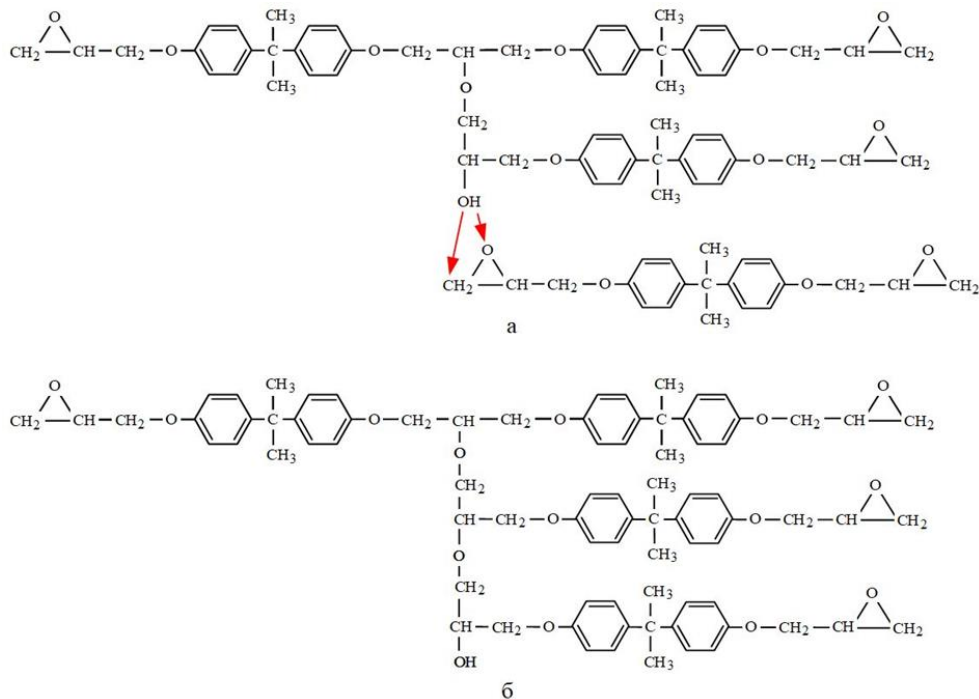


Рис. 4. Формулы, иллюстрирующие продолжение химической реакции (второй шаг). Присоединяется следующая эпoxidная молекула к уже сформированной молекулярной структуре

рис. 3, а показаны длинная и короткая эпoxidные молекулы, которые должны вступить в химическое взаимодействие. Вначале гидроксильная группа длинной эпoxidной молекулы вступает в реакцию с молекулой отвердителя. После этого происходит раскрытие эпoxidного кольца у другой молекулы эпoxidной смолы, находящейся в непосредственной близости от возникшей химической связи. Одновременно идет разрыв химической связи длинной эпoxidной молекулы с молекулой отвердителя. При этом происходит формирование химической связи между короткой и длинной эпoxidными молекулами (рис. 3, б). Отвердитель ТЭАТ-1 является катализатором хи-

мической реакции, т.е. участвует в ней, но не входит в состав продукта химической реакции. Далее процесс продолжается аналогичным образом (рис. 4, рис. 5): происходит рост глобулы. В конечном итоге получается материал с глобулярным строением структуры отвержденной эпoxidной смолы.

3. Определяющие уравнения математической модели

Для построения математической модели были выделены группы атомов, которые дают полную информацию о ходе химической реакции. Похо-

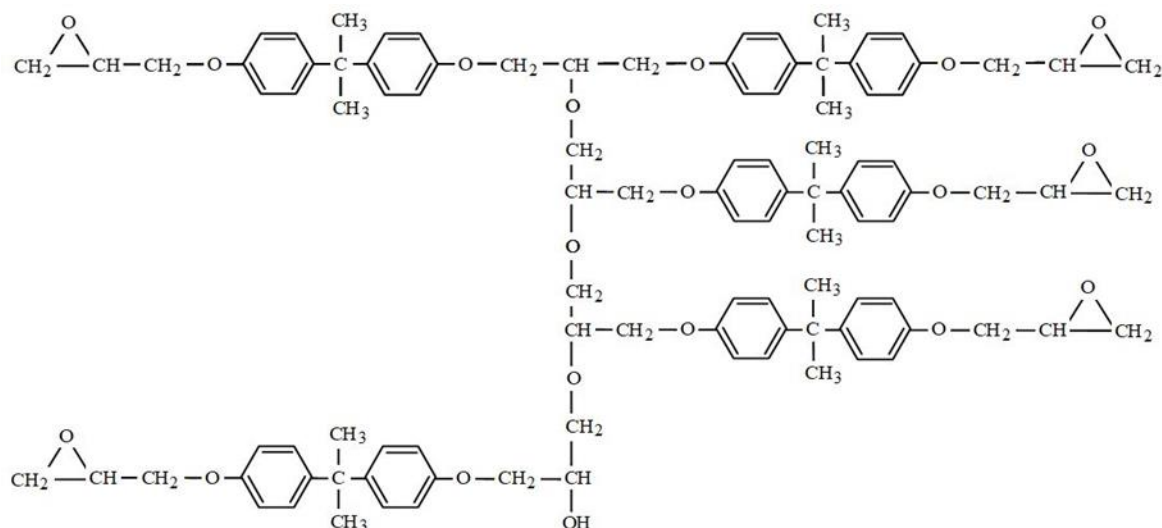


Рис. 5. Химическая формула структуры, полученной после объединения трех исходных молекул эпоксидной смолы. Происходит рост глобулы в реакционной смеси

жая идея была использована при построении модели холодного отверждения [9]. Учитывая переходы фрагментов молекул в новые группы в процессе отверждения, воспользовавшись основами кинетики химических реакций, нетрудно получить следующую систему уравнений для вычислительного моделирования изменения состава реакционной смеси в процессе отверждения.

$$\begin{aligned} \frac{dn_1^0}{dt} &= -Kn_1^0 N_h, \\ \frac{dn_2^0}{dt} &= Kn_1^0 N_h - Kn_2^0 N_{ep}, \\ \frac{dn_3^0}{dt} &= Kn_2^0 N_{ep}, \\ \frac{dn_4}{dt} &= 2Kn_1 N_h, \\ \frac{dn_2}{dt} &= 2Kn_1 N_h - Kn_2 N_{ep} - Kn_2 N_h, \\ \frac{dn_3}{dt} &= Kn_2 N_h - 2Kn_3 N_{ep}, \\ \frac{dn_4}{dt} &= Kn_2 N_{ep} - Kn_4 N_h, \\ \frac{dn_5}{dt} &= 2Kn_3 N_{ep} + Kn_4 N_h - Kn_5 N_{ep}, \\ \frac{dn_6}{dt} &= Kn_5 N_{ep}, \end{aligned}$$

где t – текущий момент времени; $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ – количество молей в единице объема групп, образованных фрагментами, возникающими из коротких молекул эпоксидной смолы, формулы которых приведены на рис. 1, $a-e$, соответственно; n_1^0, n_2^0, n_3^0 – количество молей в единице объема групп, образованных фрагментами, возникающими из длинной молекулы эпоксидной смолы, фор-

мулы которых приведены соответственно на рис. 2, $b-z$. В формулах используется количество молей в единице объема эпоксидных колец

$$N_{ep} = n_1^0 + 2n_1 + n_2 + n_4$$

и количество молей в единице объема гидроксильных групп

$$N_h = n_2^0 + n_2 + 2n_3 + n_5.$$

Коэффициент скорости химической реакции имеет вид

$$K = K_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \frac{\rho}{\rho_0} \exp\left(-\frac{E}{c_R \theta}\right),$$

в котором константа K_0 определяется экспериментально. Символами ρ и ρ_0 обозначены масса в единице объема отвердителя ТЭАТ-1 в реакционной смеси и плотность отвердителя, когда он находится в виде отдельной жидкости; E – энергия активации в температурной зависимости согласно формуле Аррениуса; θ – температура; c_R – универсальная газовая постоянная.

4. Моделирование изменения вязкости эпоксидной смолы в условиях горячего отверждения

Для расчета механических свойств реакционной смеси, а точнее, изменения ее вязкости, будем использовать экспериментальную формулу Чонга [14]. Данная формула имеет следующий вид:

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{1.25 \varphi \varphi_m}{\varphi_m - \varphi}\right)^2.$$

Здесь φ – объемная доля частиц в вязкой жидкости (объемная доля эпоксидных групп, вошедших в

твердую фазу), η_0 – вязкость жидкости, в которой не содержатся твердые частицы. В нашем случае это будет смесь, в которой отсутствуют отвердители и длинные эпоксидные молекулы. При максимальной объемной доле частиц в вязкой жидкости – φ_m они начинают касаться друг друга. Под твердыми частицам в данном случае следует понимать глобулы, т.е. соединенные друг с другом химическими связями группы атомов. Эти группы двигаются как твердые образования.

Будем полагать, что все рассматриваемые нами группы атомов имеют одинаковый объем. Поэтому объемную долю φ нужно вычислять по формуле

$$\varphi = \varphi_{ep} \frac{\sum_{i=1}^3 n_i^0 + \sum_{i=2}^6 n_i}{\sum_{i=1}^3 n_i^0 + \sum_{i=1}^6 n_i},$$

где φ_{ep} – объемная доля всех эпоксидных групп в реакционной смеси (как вошедших в твердую фазу, так и в виде молекул жидкости). В начальный момент времени под глобулами мы будем понимать зародыши новой фазы – длинные эпоксидные молекулы, т.е.

$$\varphi = \varphi_{ep} \frac{2n_{ep}^{\partial l}}{2n_{ep}^{\partial l} + n_{ep}^{кор}}.$$

Таким образом, в нашей модели неизвестными остаются параметры: K_0 , E , η_0 , φ_m . Эти константы будут определены из условия согласования расчетов с экспериментальными данными.

В работе [15] было проведено исследование свойств реакционной смеси ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1 во время отверждения материала. Эксперименты осуществлялись при условии сдвигового деформирования смеси. Процесс продолжался до момента, когда реакционная смесь не начинала оказывать сильное сопротивление сдвиговому деформированию. Использована реакционная смесь, в которой соотношение массы эпоксидной смолы к массе отвердителя составляло 10 к 1.

В состав эпоксидной смолы входят короткие и длинные молекулы. Хроматография эпоксидной смолы ЭД-20 показала существование двух пиков, относящихся к наличию длинных и коротких молекул. Установлено, что на 100 коротких молекул смолы приходится 8 длинных молекул, содержащих гидроксильные группы. Эти гидроксильные группы являются инициаторами химической реакции. Для расчетов были использованы следующие начальные условия:

$$n_1^0(0) = 0.00013 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3}, \quad n_2^0(0) = 0, \quad n_3^0(0) = 0,$$

$$n_1(0) = 0.003 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3}, \quad n_2(0) = 0.00013 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{СМ}^3},$$

$$n_3(0) = 0, \quad n_4(0) = 0, \quad n_5(0) = 0, \quad n_6(0) = 0.$$

На рис. 6 показано сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования химической реакции отверждения при температуре 100°C и 140°C. Максимальная объемная доля частиц $\varphi_m = 0.88$. При температуре 100°C коэффициент скорости химической реакции $K = 3.8$, при температуре 140°C – $K = 8.7$. Отсюда вычисляем $E = 2.41$ кДж, и $K_0 = 931.81$ моль/(л·с).

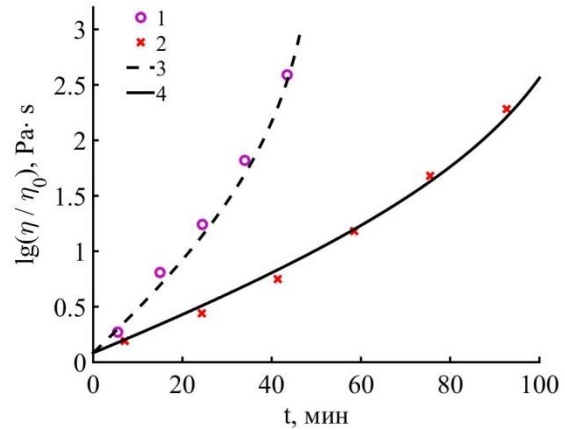


Рис. 6. Зависимость изменения вязкости во времени: 1 – результаты экспериментов при температуре 140°C, 2 – результаты экспериментов при температуре 100°C, 3 – результаты математического моделирования при температуре 140°C, 4 – результаты математического моделирования при температуре 100°C

Результаты исследования поведения смеси с помощью реометра Physica MCR 501 при температуре 100°C показали, что примерно около сотой минуты значительно уменьшается значение угла сдвига фаз [15]. Это свидетельствует о том, что в это время происходит переход из вязкотекучего состояния к состоянию, когда среду следует рассматривать как деформируемый материал. При этом в материале в результате наличия больших сдвиговых деформаций появляются повреждения. На рисунке видно, что, согласно теоретическому расчету, примерно около сотой минуты среда перестает быть вязкой жидкостью. Это означает, что частицы новой фазы начинают касаться друг с другом, объединяются в одну сплошную среду. Вязкость в этот момент становится бесконечной. Деформируемая среда начинает разрываться в различных местах, и получившиеся при разрушении куски материала начинают соприкасаться друг с другом. Аналогичная ситуация наблюдается при температуре 140°C, при этом процесс происходит быстрее. Переход из вязкотекучего состояния к деформируемой среде, в которой происходят разрушения, происходит в этом случае на сороковой минуте.

Максимальная объемная доля частиц получилась больше значения 0.66, которое возможно при условии, когда все частицы имеют одинаковый

размер и имеют сферическую форму. Это объясняется тем, что в реальном эксперименте появляющиеся частицы не могут иметь один и тот же размер. Поэтому значение максимально возможной объемной доли частиц в вязкотекучем состоянии больше. Кроме того, частицы, вероятнее всего, будут иметь продолговатую форму, что может привести к еще большему увеличению объемной доли φ_m .

5. Заключение

Построены определяющие соотношения математической модели реакции горячего отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЕАТ-1. Математическая модель учитывает изменение концентраций фрагментов молекул реакционной смеси, которые дают полную информацию о ходе химической реакции. С помощью представлений о формировании глобулярной структуры материала в процессе отверждения реакционной смеси предложен способ вычисления изменения вязкости системы в процессе отверждения. Приведенная в данной статье модель позволит в дальнейшем исследовать в рамках вычислительных экспериментов скорость отверждения препрега в космосе с учетом возможного испарения компонентов смеси при изменении температур в результате попеременного нахождения спутника на солнечной и теневой сторонах Земли.

Авторы статьи благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за оказанную финансовую поддержку работы в рамках проекта № 16-48-590844.

Список литературы

1. Владимиров В. М., Кондратьев А. С., Крылов Ю. В., Марков В. В., Федотов П. М., Шепов В. Н. Щелевая полосковая антенна вытекающей волны с дополнительными щелями с малой электрической длиной // Антенны. 2012. № 11 (186). С. 12–17.
2. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (ч. 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2 (15). С. 51–57.
3. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (ч. 2) // Вестник СибГАУ. 2007. № 3 (16). С. 78–81.
4. Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4. С. 110–119.
5. Freeland R. E. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna – experiment // Acta Astronautica. 1996. Vol. 38. N. 4–8. P. 251–260.
6. Chodimella S. P. Design evaluation of a large aperture deployable antenna // AIAA Papers. 2006. N. 1603. P. 1–20.
7. Reibaldi G. G. QUASAT program: the ESA reflector // Acta Astronautica. 1987. Vol. 15. N. 3. P. 181–187.
8. Елисеева А. Ю., Свистков А. Л., Кондюрин А. В. Математическая модель реакции горячего отверждения препрега // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 4 (38). С. 19–25.
9. Kondyurin A. V., Komar L. A., Svistkov A. L. Combinatory model of curing process in epoxy composite // Composites Part B: Engineering. 2012. V. 43. P. 616–620.
10. Русаков С. В., Свистков А. Л., Комар Л. А., Кондюрин А. В. Моделирование отверждения эпоксидной смолы в условиях открытого космоса // Мат. XVIII Межд. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС 2013), 22–31 мая 2013 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2013. С. 128–130.
11. Михайлин Ю. А., Кербер М. Л., Горбунова И. Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов // Пластические массы. 2002. № 2. С. 14–21
12. Онучин Д. В., Бригаднов К. А., Горбунова И. Ю., Сиротин И. С., Биличенко Ю. В., Филатов С. Н., Кербер М. Л., Кравченко Т. П., Куреев В. В. Реокинетика отверждения эпоксидного олигомера эд20, модифицированного эпоксифосфазенами // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2015. Т. 57. № 5. С. 322–327
13. Зеленский Э. С., Куперман А. М., Горбаткина Ю. А., Иванова-Мумжиева В. Г., Берлин А. А. Армированные пластики – современные конструкционные материалы // Российский химический журнал. 2001. Т. 45. № 2. С. 56–74.
14. Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D. Rheology of concentrated suspensions // Journal of Applied Polymer Science. 1971. Vol. 15. P. 2007–2021.
15. Garishin O. K., Svistkov A. L., Belyaev A. Yu., Gillev V.G. On the possibility of using epoxy prepregs for carcass-inflatable nanosatellite antennas // Materials Science Forum. 2018. Vol. 938. P. 156–163.

References

1. Vladimirov V. M., Kondratyev A. S., Krylov Yu. V., Markov V. V., Fedotov P. M., Shepov V. N. Patch slot leaky-wave antenna with additional slot oscillators with short electrical length. *Antennas*, 2012, no. 11 (186), pp. 12–17 (In Russian).
2. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. The review of designs of modern transformed space antennas (part 1). *Siberian Journal of Science and Technology*, 2007, no. 2 (15), pp. 51–57 (In Russian).

3. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. The review of designs of modern transformed space antennas (part 2). *Siberian Journal of Science and Technology*, 2007, no. 3 (16), pp. 78–81 (In Russian).
4. Ponomarev S. V. Transformable reflectors of spacecraft antennas. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2011, no. 4, pp. 110–119 (In Russian).
5. Freeland R. E. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna – experiment. *Acta Astronautica*, 1996, vol. 38, no. 4–8, pp. 251–260.
6. Chodimella S. P. Design evaluation of a large aperture deployable antenna. *AIAA Papers*, 2006, no. 1603, pp. 1–20.
7. Reibaldi G. G. QUASAT program: the ESA reflector. *Acta Astronautica*, 1987, vol. 15, no. 3, pp. 181–187.
8. Eliseeva A. Yu., Svistkov A. L., Kondyurin A. V. Mathematical model of the reaction for hot curing of a prepreg of a nanosatellite antenna. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 4 (38), pp. 19–25.
9. Kondyurin A. V., Komar L. A., Svistkov A. L. Combinatory model of curing process in epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 616–620.
10. Rusakov S. V., Svistkov A. L., Komar L. A., Kondyurin A. V. Modeling of epoxy composite curing in open space conditions. *Proc. of 18th Int. Conf. On Computational Mechanics and Modern Applied Program Systems*, 22–31 May 2013, Alushta, Russia. Moscow: MAI, 2013, pp. 128–130 (In Russian).
11. Mikhailin Yu. A., Kerber M. L., Gorbunova I. Yu. Binders for polymer composites. *Plastic Masses*, 2002, no. 2, pp. 14–21 (In Russian).
12. Onuchin D. V., Brigadnov K. A., Gorbunova I. Yu., Sirotin I. S., Bilichenko Yu. V., Filatov S. N., Kerber M. L., Kravchenko T. P., Ki-reev V. V. Rheokinetics of the curing of epoxy oligomer ED-20 modified with epoxy phosphazenes. *Polymer Science Series B*, 2015, vol. 57, no. 5, pp. 402–407.
13. Zelenskii E. S., Kuperman A. M., Gorbatkina Iu. A., Ivanova-Mumzhieva V. G., Berlin A. A. Armirovannye plastiki – sovremennyye konstruktivnyye materialy (Armed plastics – modern conformational materials). *Russian Journal of General Chemistry*, 2001, vol. 45, no. 2, pp. 56–74 (In Russian).
14. Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D. Rheology of concentrated suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*, 1971, vol. 15, pp. 2007–2021.
15. Garishin O. K., Svistkov A. L., Belyaev A. Yu., Gilev V. G. On the possibility of using epoxy prepreps for carcass-inflatable nanosatellite antennas. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 938, pp. 156–163.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Свистков А. Л., Елисеева А. Ю., Кондюрин А. В. Математическая модель реакции отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1 // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 1. С. 9–16. doi: 10.17072/1994-3598-2019-1-09-16

Please cite this article in English as:

Svistkov A. L., Eliseeva A. Yu., Kondyurin A. V. Mathematical model for ED-20 rigidization with a rigidizer TEAT-1. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 1, pp. 9–16. doi: 10.17072/1994-3598-2019-1-09-16