

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАКРОМОЛЕКУЛ

Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, В.Д. Минаков, И.А. Маняхин, Д.А. Ильченко

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ, г. Бийск

Многообещающее направление исследований, которое потенциально может служить базой для создания эффективной технологии управления свойствами полимеров – воздействие механическими колебательными возмущениями на высокомолекулярную среду. В реальных неотверждённых полимерах механические колебательные возмущения, как правило, представляют собой кавитационно-акустическое воздействие, т.е. линейные синусоидальные колебания, создаваемые в среде, инициируют вторичное явление – кавитационные пузырьки. Пузырьки при кавитационно-акустическом воздействии периодически расширяются и схлопываются, формируя микроударные волны. Таким образом, механические колебательные возмущения имеют две составляющие – линейная синусоидальная и нелинейная ударно-волновая. Основное воздействие на структуру полимеров оказывает ударно-волновая составляющая. Для реализации данного процесса с максимальной энергетической эффективностью необходимо выявить оптимальные режимы воздействия. Для выявления оптимальных режимов воздействия в статье теоретически обоснован физический механизм разрушения макромолекул, основанный на их соударении со скоростью, превышающей критическую за счёт формирования экстремальных условий по температуре и давлению в окрестности схлопывающегося кавитационного пузырька.

Ключевые слова: макромолекула, разрушение, кавитация.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день задача управления свойствами полимеров, в основном, решается путём введения дополнительных химических добавок – отвердителей, пластификаторов, дисперсных наполнителей, УФ-стабилизаторов и т. д. [1–3] Однако дополнительные химические добавки, в первую очередь, являются расходным материалом, что отрицательно сказывается на себестоимости конечного продукта, являются агрессивными средами, которые делают получаемый целевой материал вредным для человека и окружающей среды, а также приводящим к коррозии металлических деталей и узлов технической системы. Причём химические добавки, зачастую, делают вредным как производство, так и эксплуатацию материала. Другой недостаток химических добавок состоит в том, они могут улучшать одни целевые свойства и ухудшать другие свойства. Например, добавка 2-(2'-гидрокси-3',5'-дитретиамилфенил) бензотриазола (УФ-стабилизатора) в жидкое эпоксидное связующее может увеличивать стойкость композиционного материала к УФ-излучению, но при этом снижать механическую прочность материала на 15%.

Многообещающее направление исследований, которое потенциально может служить базой для создания эффективной технологии управления свойствами полимеров – воздействие механическими колебательными возмущениями на высокомолекулярную среду. В реальных неотверждённых полимерах механические колебательные возмущения, как правило,

представляют собой кавитационно-акустическое воздействие, т.е. линейные синусоидальные колебания, создаваемые в среде, инициируют вторичное явление – кавитационные пузырьки. Пузырьки при кавитационно-акустическом воздействии периодически расширяются и схлопываются, формируя микроударные волны. Таким образом, механические колебательные возмущения имеют две составляющие – линейная синусоидальная и нелинейная ударно-волновая.

Механические колебательные возмущения позволяют управлять свойствами полимеров в связи с тем, что энергии таких возмущений оказывается достаточно для разрушения или образования новых водородных и углеродных связей в полимерах, и варьированием параметров и формы возмущений можно плавно изменять свойства материалов и тем самым получать материалы с определёнными заранее заданными свойствами [4–10]. Например, экспериментально доказано, что кавитационно-акустическое воздействие на эпоксидное связующее с наполнителем повышает прочность композиционного материала до 70%, что может с большим запасом компенсировать снижение прочности, обусловленное добавлением УФ-стабилизатора. Всё это достигается за счёт повышения частоты взаимодействий макромолекул веществ между собой в кавитационно-акустическом поле, разрушения существующих химических связей и формирования новых связей и т. д. Другая особенность механических колебательных возмущений – они способны управлять отдельными свойствами целевого материала (можно плавно изменять свойства путём

подбора режимов и продолжительности воздействия) без применения расходных материалов. Например, такое воздействие позволяет эффективно снижать вязкость неотверждённых полимеров (до 5 раз и более за время 1...2 мин) без применения химических добавок и нерастворимых в полимере жидкостей (например, без добавления воды в нефть для получения водонефтяной эмульсии, которая менее вязкая, чем исходная нефть). При этом для отдельных видов полимеров (например, фенолформальдегидной смолы) наблюдается отложенный эффект – вязкость повышается более чем на 20% относительно исходного неотверждённого полимера после снятия воздействия.

Для выявления оптимальных режимов воздействия, способных изменять свойства полимера с максимальной энергетической эффективностью, необходимо научное обоснование физического механизма разрушения макромолекул под действием кавитации, которое описано далее.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Как известно, полимеры в неотверждённом состоянии представляют собой жидкие среды, состоящие из молекулярных цепочек мономеров, соединённых водородными связями. Кавитация приводит к разрушению молекулярных цепочек. При этом фракционный состав молекулярных цепочек по концентрации молекул с разными количествами мономерных звеньев определяет реологические свойства материала, от которых, в конечном итоге, зависит прочность изделия на базе полимера с добавленным отвердителем, пропитывающая способность и однородность структуры материала.

Структура молекулярных цепочек и взаимодействие между мономерными звеньями описаны в работах ряда авторов [11–13], которые взяты за основу для построения численной модели разрушения макромолекул под действием кавитации.

Для олигомеров, находящихся в жидком агрегатном состоянии, можно выделить следующие структурные особенности:

1. Все мономерные звенья макромолекул имеют одинаковую массу m_0 .

2. Наиболее вероятное количество мономерных звеньев в цепи для олигомера, находящегося в жидком агрегатном состоянии, не превышает 50...100.

3. Потенциал взаимодействия между мономерными звеньями может быть приближённо описан функцией Морзе.

$$V(r) = D_\sigma \left(\left(1 - e^{-a(r-r_e)} \right)^2 - 1 \right); \quad (1)$$

где V – величина потенциальной энергии взаимодействия мономерных звеньев, находящихся на расстоянии r (м) друг от друга, Дж; D_σ – модуль энергии взаимодействия между парой мономерных

звеньев мономерными звеньями, Дж; r_e – равновесное расстояние между мономерными звеньями, м; a – постоянная экспоненциальной убыли энергии взаимодействия с увеличением расстояния, m^{-1} .

Приведённое выражение может быть аппроксимировано квадратичной функцией (потенциал гармонического осциллятора) для мономерных звеньев, расстояние между которыми находится вблизи равновесного:

$$V(r) \approx D_\sigma (a^2(r-r_e)^2 - 1); \quad (2)$$

Это означает, что при нормальных условиях соседние мономерные звенья в макромолекуле могут быть представлены в виде эквивалентных материальных точек конечной массы, соединённых пружиной (модель «бусинок-пружинок»). Поскольку мономерные звенья в данной модели, не связанные напрямую пружиной, взаимодействуют с конечной силой $\left(-\frac{dV}{dr}(r) = -2aD_\sigma (1 - e^{-a(r-r_e)}) e^{-a(r-r_e)} \right)$. Эта сила

способствует формированию изгибов цепи. Однако для большинства олигомеров эта сила составляет (для мономерных звеньев, находящихся на расстоянии $2r_e$ друг от друга) $D_\sigma \left(\left(1 - e^{-a(r-r_e)} \right)^2 - 1 \right)$

Поскольку ультразвуковое воздействие и вторичные эффекты (кавитация, радиационное давление, акустические течения), образуемые под действием ультразвука, представляют собой волновые изменения механических параметров среды (возникновение электрического поля под действием кавитации характерно лишь для маловязких низкомолекулярных сред) – скорости, давления. Также согласно закону адиабаты меняется температура среды в локальных зонах (из-за того, что среда, обладает конечной теплопроводностью, в течение длительного времени происходит диссипация части энергии ультразвука в увеличение внутренней энергии среды – температура среды после отключения ультразвукового воздействия оказывается несколько больше, чем начальная температура среды). Следовательно, на уровне отдельных макромолекул под действием ультразвука меняется скорость их хаотического движения. Соответственно, между макромолекулами других сил взаимодействия, кроме сил водородных связей между мономерными звеньями, не возникает.

В свою очередь, как показали данные ИК- и ЯМР-спектроскопии [14–16], при действии мощного ультразвука изменение макроскопических свойств олигомеров происходит за счёт разрыва пар водородных связей, т.е. когда молекулярная цепь разрушается несколько более мелких цепей (цепей с количеством мономерных звеньев, меньшим чем у исходной цепи).

Поскольку, как уже говорилось, другие силы, способные разрушить соединённые мономерные

звенья, кроме потенциала Морзе со стороны третьих мономерных звеньев, отсутствуют, то возникает предположение, что связь между парой мономерных звеньев разрушается из-за силового воздействия со стороны третьего мономерного звена, набегающего из бесконечности (из расстояния, много большего, чем r_e , т.е. речь идёт о мономерном звене другой макромолекулы).

Для проверки данного предположения проведено численное решение задачи в следующей математической постановке, проиллюстрированной рис. 1.

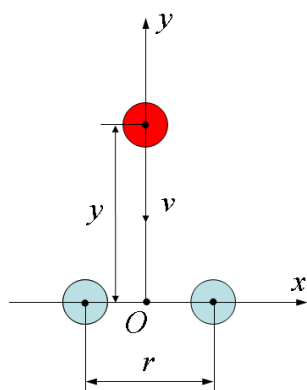


Рис. 1. Схема-иллюстрация к модели задаче разрушения водородной связи между парой мономерных звеньев из-за набегающего третьего звена

Поскольку задача симметрична (ось симметрии имеет расположение $x=0$), то данная система мономерных звеньев описывается 2-мя дифференциальными уравнениями 2-го порядка:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -2f(r) - \frac{r}{\sqrt{\frac{r^2}{4} + y^2}} f\left(\sqrt{\frac{r^2}{4} + y^2}\right); \quad (3)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -3 \frac{y}{\sqrt{\frac{r^2}{4} + y^2}} f\left(\sqrt{\frac{r^2}{4} + y^2}\right); \quad (4)$$

где r – расстояние между исходными мономерными звеньями; y – разность координат по оси y между набегающим мономерным звеном и линией центров исходных мономерных звеньев; $f(r)$ – сила притяжения между мономерными звеньями, находящимися на расстоянии r друг от друга, равная $f(r) = 2(1 - e^{-ar_e(r-1)})e^{-ar_e(r-1)}$.

Система уравнений (3, 4) дополнена следующими начальными условиями:

$$r(0) = 1; \frac{dr}{dt}(0) = 0; y(0) = L \gg 1; \frac{dy}{dt}(0) = -V_0.$$

В уравнениях (3, 4) все величины являются безразмерными со следующими параметрами

масштаба: координаты – r_e ; времени – $\sqrt{\frac{m_0 r_e}{\alpha D_\sigma}}$; силы –

αD_σ . Параметры масштаба производных величин будут выглядеть следующим образом: скорости – $\sqrt{\frac{\alpha r_e D_\sigma}{m_0}}$; энергии – $\alpha r_e D_\sigma$; массы – m_0 . Эти же

параметры масштаба принимаются в последующих безразмерных уравнениях динамики взаимодействующих мономерных звеньев.

Справедливо утверждение

$$\forall L, V_0 \exists V_{cr}, r_{cr} \left((t_0 > 0) \& (r(t_0) \geq r_{cr}) \& \left(\frac{dr}{dt}(t_0) \geq V_{cr} \right) \right) \Rightarrow \Rightarrow r(t) \text{ – неограниченная функция на множестве } [t_0; \infty)$$

Доказательство утверждения проводится с помощью интегральной оценки. При этом принимается, что функции $r(t)$ и $y(t)$ являются непрерывно-дифференцируемыми, как следует из уравнений (3, 4).

Для проверки, будет ли при данной начальной скорости 3-й набегающей частицы V_0 разорвана связь исходных мономерных звеньев, необходимо решить нелинейную задачу с участием двух функций $r(t)$ и $y(t)$. Данная задача решалась численно. На рис. 2 представлены зависимости расстояния между исходными частицами от времени при различных скоростях набегающей частицы.

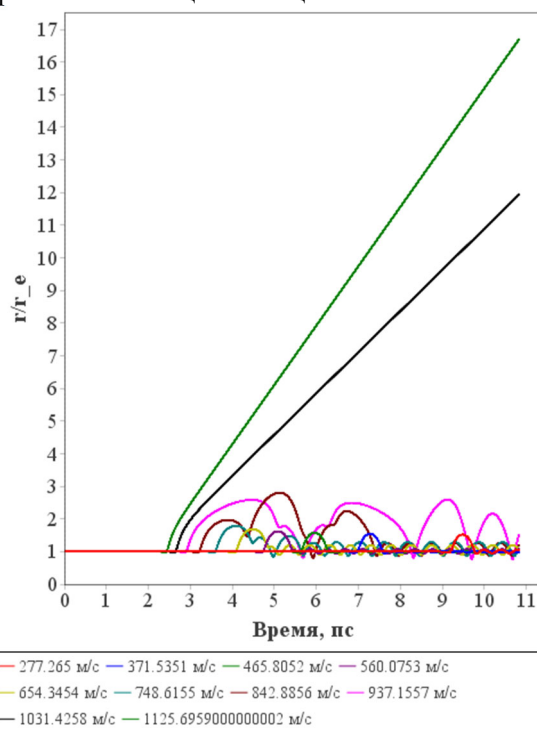


Рис. 2. Зависимости расстояния между мономерными звеньями от времени при различных начальных скоростях набегающего 3-го звена

Как следует из рис. 2, условие инфинитности движения исходных мономерных звеньев выполняется при начальной скорости 3-го звена более 1000 м/с. Согласно кинетической теории жидкостей [17] можно оценить, что такая относительная скорость макромолекул для олигомеров при нормальных условиях оказывается очень маловероятной (согласно выражению

$$\sim e^{-\frac{N\mu_0 v_{\min}^2}{2RT}}$$

вероятность обнаружения макромолекул весом 50 со скоростью более 1000 м/с составляет $p \sim 3 \cdot 10^{-188}$. С учётом длины свободного пробега половина от имеющихся макромолекул распадается на фрагменты при нормальных условиях за время порядка

$$t \sim \frac{0,5\lambda}{pv_{\min}} = \frac{0,5\sqrt{\frac{1}{n}}}{pv_{\min}} = \frac{0,5\sqrt{\frac{N\mu_0}{N_A\rho}}}{pv_{\min}} \sim 2 \cdot 10^{175} \text{ с.}$$

Однако при экстремальных условиях, когда температура достигает 5000 К (как при схлопывании кавитационного пузырька) вероятность разрушения макромолекул в результате соударения повышается до $p \sim 10^{-10}$. А время разрушения половины фрагментов в зоне экстремальной температуры достигает $t \sim 6 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$

С учётом того, что такая высокая температура достигается в доле объёма $\delta = R_{\text{bub min}}^3 n_{\text{bub}} = 10^{-8}$, оценочное время разрушения половины фрагментов оказывается обозримым и составляет $t \sim 6 \cdot 10^5 \text{ с.}$ Таким образом, кавитация вызывает увеличение частоты соударений макромолекул с критическими скоростями, вызывающими разрушение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически обоснован физический механизм разрушения макромолекул, основанный на их соударении со скоростью, превышающей критическую за счёт формирования экстремальных условий по температуре и давлению в окрестности схлопывающегося кавитационного пузырька.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МК-5387.2021.1.1.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Nikafshar, S. The Effects of UV Light on the Chemical and Mechanical Properties of a Transparent Epoxy-Diamine System in the Presence of an Organic UV Absorber [Текст] / S. Nikafshar, O. Zabihi, M. Ahmadi, A. Mirmoheeni, M. Taseidifar, M. Naebe // Materials (Basel). – 2017. – 10(2). – P. 180.
2. Ожогин, А.В. Увеличение устойчивости к УФ-излучению промышленных изделий из стеклопластика [Текст] / А.В. Ожогин,

М.А. Ленский, Д.В. Корабельников, А.Н. Новицкий // Пластические массы. – 2019. – № 1-2. – С. 57–59.

3. Ожогин, А.В. Борорганические олигомерные светостабилизаторы для стеклопластиков [Текст] / А.В. Ожогин, М.А. Ленский, Д.В. Корабельников, А.Н. Новицкий // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. – 2018. – С. 262–270.

4. Huang, Y.D. Influence of ultrasonic treatment on the characteristics of epoxy resin and the interfacial property of its carbon fiber composites [Текст] / Y.D. Huang, L. Liu, J.H. Qiu, L. Shao // Composit. Sci. Techn., 2002. – Vol. 62. – P. 2153.

5. Mullakaev, M.S. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions [Текст] / Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2015. – Vol. 49. – No. 3. – P. 287–296.

6. Волкова, Г.И. Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения вязкостно-температурных характеристик [Текст] / Г.И. Волкова, И.В. Прозорова, Р.В. Ануфриев, Н.В. Юдина, М.С. Муллакаев, В.О. Абрамов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2012. – № 2. – С. 3–6.

7. Prachkin, V.G. Improving the productivity of wells by means of acoustic impact on high-viscosity oil in the channels of the face zone of a well [Текст] / V.G. Prachkin, M.S. Mullakaev, D.F. Asylbaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – Vol. 50. – Issue 9-10. – P. 571–575.

8. Mohapatra, H. Mechanically controlled radical polymerization initiated by ultrasound [Текст] / H. Mohapatra, M. Kleiman, A.P. Esser-Kahn // Nature Chemistry. – 2017. – Volume 9. – P. 135–139.

9. Cass, P. Preparation of hydrogels via ultrasonic polymerization [Текст] / P. Cass, W. Knowler, E. Perceia, N.P. Holmes, T. Hughes // Ultrason Sonochem. – 2010. – 17(2). – P. 326–332.

10. Марсумова, А.Ф. Влияние ультразвуковой обработки на технологические свойства эпоксидного олигомера [Текст] / А.Ф. Марсумова, Л.М. Амирова, М.М. Ганиев // Вестник КГТУ им. Туполева. – 2005. – №2.

11. Маслош, В.З. Методики определения степени полимеризации карбамидоформальдегидных олигомеров / В.З. Маслош, Н.П. Головненко, Н.Е. Шолух // Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development'2017. – 15 с.

12. Образовский, Е.Г. Кинетика полимеров: Учеб. Пособие / Е.Г. Образовский; Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. – 210 с.

13. Legon, A.C. A reduced radial potential energy function for the halogen bond and the hydrogen bond in complexes B...XY and B...HX, where X and Y are halogen atoms [Текст] / A.C. Legon // Phys. Chem. Chem. Phys., 2014. – 16. – P. 12415–12421.

14. Naeimirad, M. Fabrication and characterization of silicon carbide/epoxy nanocomposite using silicon carbide nanowhisker and nanoparticle reinforcements [Текст] / M. Naeimirad, A. Zadhoush, R.E. Neisiany // Journal of Composite Materials. – 2015. – P. 1–12.

15. Kasaai, M.R. Fragmentation of chitosan by ultrasonic irradiation [Текст] / M.R. Kasaai, J. Arul, G. Charlet // Ultrasonic Sonochemistry. – Ultrasonics Sonochemistry. – 2008. – 15. – P. 1001–1008.

16. Gonza'lez, M.G. Applications of FTIR on Epoxy Resins - Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake [Текст] / M.G. Gonza'lez, J.C. Cabanelas, J. Baselga // Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology. – 2012.

17. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. - Изд-во "Наука", Ленингр. отд., Л., 1975, 592 с.

Гольх Роман Николаевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru

Хмельёв Владимир Николаевич – доктор технических наук, заместитель директора по НР, Бийский технологический

*институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432581,
e-mail: vnh@bti.secna.ru*

*Минаков Вячеслав Дмитриевич – магистрант, Бийский
технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел.
(3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru*

*Маняхин Иван Александрович – студент, Бийский
технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел.
(3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru*

*Ильченко Дмитрий Александрович – студент, Бийский
технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел.
(3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru*

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE PHYSICAL MECHANISM OF ULTRASONIC CAVITATION DESTRUCTION OF MACROMOLECULES

R.N. Golykh, V.N. Khmelev, V.D. Minakov, I.A. Manyakhin, D.A. Ilchenko

Biysk Technological Institute, Biysk

Abstract – A promising area of research that can potentially serve as a basis for creating an effective technology for controlling the properties of polymers is the effect of mechanical oscillatory disturbances on a high-molecular medium. In real uncured polymers, mechanical oscillatory disturbances, as a rule, represent a cavitation-acoustic effect, i.e. linear sinusoidal vibrations created in the medium initiate a secondary phenomenon - cavitation bubbles. Bubbles under cavitation-acoustic action periodically expand and collapse, forming micro-shock waves. Thus, mechanical oscillatory disturbances have two components – linear sinusoidal and nonlinear shock wave. The main effect on the structure of polymers has a shock-wave component. To implement this process with maximum energy efficiency, it is necessary to identify optimal exposure modes. In order to identify optimal exposure modes, the article theoretically substantiates the physical mechanism of destruction of macromolecules based on their collision with a velocity exceeding the critical one due to the formation of extreme conditions for temperature and pressure in the vicinity of a collapsing cavitation bubble.

Index terms: macromolecule, breakup, cavitation.

REFERENCES

1. Nikafshar, S. The Effects of UV Light on the Chemical and Mechanical Properties of a Transparent Epoxy-Diamine System in the Presence of an Organic UV Absorber [Текст] / S. Nikafshar, O. Zabihi, M. Ahmadi, A. Mirmohseni, M. Taseidifar, M. Naebe // *Materials (Basel)*. – 2017. – 10(2). – P. 180.
2. Ozhogin, A.V. Increase in resistance to UV radiation of industrial fiberglass products [Text] / A.V. Ozhogin, M.A. Lensky, D.V. Korabelnikov, A.N. Novitskiy // *Plastic masses*. – 2019. – No. 1-2. – P. 57-59.
3. Ozhogin, A.V. Organoboron oligomeric stabilizers for GRP [Text] / A.V. Ozhogin, M. A. Lensky, D. V. Korabel'nikov, A. N. Novitskiy // *Polymer composite materials and manufacturing next-generation technologies: materials of the III all-Russian scientific-technical conference*. – 2018. – P. 262-270.
4. Huang, Y.D. Influence of ultrasonic treatment on the characteristics of epoxy resin and the interfacial property of its carbon fiber composites [Текст] / Y.D. Huang, L. Liu, J.H. Qiu, L. Shao // *Composit. Sci. Techn.*, 2002. – Vol. 62. – P. 2153.
5. Mullakaev, M.S. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions [Текст] / Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 49. – No. 3. – P. 287–296.
6. Volkova, G.I. Ultrasonic oil treatment to improve viscosity-temperature characteristics [Text] / G.I. Volkova, I.V. Prozorova, R.V. Anufriev, N.V. Yudina, M.S. Mullakaev, V.O. Abramov // *Oil refining and petrochemistry*. – 2012. – No. 2. – pp. 3-6.
7. Prachkin, V.G. Improving the productivity of wells by means of acoustic impact on high-viscosity oil in the channels of the face zone of a well [Текст] / V.G. Prachkin, M.S. Mullakaev, D.F. Asylbaev // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2015. – Vol. 50. – Issue 9-10. – P. 571–575.
8. Mohapatra, H. Mechanically controlled radical polymerization initiated by ultrasound [Текст] / H. Mohapatra, M. Kleiman, A.P. Esser-Kahn // *Nature Chemistry*. – 2017. – Volume 9. – P. 135–139.
9. Cass, P. Preparation of hydrogels via ultrasonic polymerization [Текст] / P. Cass, W. Knowler, E. Perecia, N.P. Holmes, T. Hughes // *Ultrason Sonochem*. – 2010. – 17(2). – P. 326–332.
10. Magsumova, A.F. The influence of ultrasonic treatment on the technological properties of an epoxy oligomer [Text] / A.F. Magsumova, L.M. Amirova, M.M. Ganiev // *Bulletin of KSTU. Tupolev*. – 2005. – No.2.
11. Maslosh, V.Z. Methods for determining the degree of polymerization of carbamide-formaldehyde oligomers / V.Z. Maslosh, N.P. Golovenko, N.E. Sholukh // *Scientific research and their practical application. Modern state and ways of development-ment'2017* – 15 p.
12. Obrazovskiy, E.G. Kinetics of polymers: Textbook. Manual / E.G. Obrazovskiy; Novosibirsk State University. - Novosibirsk: CPI NSU, 2019 – 210 p.
13. Legon, A.C. A reduced radial potential energy function for the halogen bond and the hydrogen bond in complexes B...XY and B...HX, where X and Y are halogen atoms [Текст] / A.C. Legon // *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014. – 16. – P. 12415–12421.
14. Naeimirad, M. Fabrication and characterization of silicon carbide/epoxy nanocomposite using silicon carbide nanowhisker and nanoparticle reinforcements [Текст] / M. Naeimirad, A. Zadhoush, R.E. Neisiany // *Journal of Composite Materials*. – 2015. – P. 1–12.
15. Kasaai, M.R. Fragmentation of chitosan by ultrasonic irradiation [Текст] / M.R. Kasaai, J. Arul, G. Charlet // *Ultrasonic Sonochemistry*. – Ultrasonics Sonochemistry. – 2008. – 15. – P. 1001–1008.
16. Gonza'lez, M.G. Applications of FTIR on Epoxy Resins -Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake [Текст] / M.G. Gonza'lez, J.C. Cabanelas, J. Baselga // *Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology*. – 2012.
17. Frenkel Ya.I. Kinetic theory of liquids. - Publishing house "Science", Leningr. ed., L., 1975, 592 p.

Golykh Roman Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, senior researcher, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru

Khmelev Vladimir Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, deputy director for science, Biysk Technological Institute, (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru

Minakov Vyacheslav Dmitrievich – master, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru

Manyakhin Ivan Alexandrovich – student, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru

Ilchenko Dmitriy Alexandrovich – student, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru