

## *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования*

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-529

doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-4-12

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГОМОГЕНИЗИРОВАНИЯ ПОЛИУРЕТАНА В ВАКУУМНОЙ ЛИТЬЕВОЙ УСТАНОВКЕ**

**Герман Юрьевич Прокудин**

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

impulsvlg@yandex.ru

**Аннотация.** Целью исследования является повышение качества полиуретановых изделий, получаемых методом литья, за счёт внедрения автоматизированного процесса ультразвукового гомогенизирования в составе вакуумной литьевой установки. Задачей является разработка и реализация эффективной системы управления многопараметрическим технологическим процессом, включающим дозирование, смешивание, вакуумирование, ультразвуковую обработку и заливку смеси. В исследовании применены методы: схемотехнического моделирования, программирования микроконтроллеров, разработки графического интерфейса пользователя и экспериментальной оценки прочностных характеристик полиуретана при варьировании параметров ультразвуковой обработки. Научная новизна работы заключается в интеграции ультразвукового гомогенизатора в традиционную вакуумную литьевую установку и автоматизации всех стадий процесса с возможностью гибкой настройки параметров. Впервые показано влияние мощности ультразвука на прочность полиуретана в условиях вакуума. В результате экспериментальных испытаний установлено, что при мощности ультразвука 300 Вт достигается оптимальный эффект: прочность полиуретана увеличивается на 60 % по сравнению с классическим перемешиванием. Разработанная система управления и алгоритмы позволили обеспечить стабильность, воспроизводимость и минимизацию дефектов в изделиях. Сделанные выводы подтверждают целесообразность внедрения данной технологии в мелкосерийное производство высококачественных пластмассовых деталей.

**Ключевые слова:** система управления, программное обеспечение, ультразвуковое гомогенизирование, литьевая установка, полиуретан, пластмассовые изделия

**Для цитирования:** Прокудин Г.Ю. Автоматизация процесса ультразвукового гомогенизирования полиуретана в вакуумной литьевой установке // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №3 (29). С. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-4-12.

Original article

Open Access Article

### **AUTOMATING THE ULTRASONIC HOMOGENIZATION PROCESS OF POLYURETHANE IN A VACUUM CASTING MACHINE**

**German Yu. Prokudin**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

impulsvlg@yandex.ru

**Abstract.** The aim of the study is to improve the quality of polyurethane products obtained by casting due to implementing an automated ultrasonic homogenization process as part of a vacuum casting machine. The objective is to develop and implement an effective control system of a multiparameter technological process, including dosing, mixing, vacuuming, ultrasonic treatment, and pouring the mixture. The research applies such methods as circuit design model-

ling, microcontroller programming, developing a graphical user interface, and experimental evaluation of the polyurethane strength characteristics under varying parameters of ultrasonic treatment. The scientific novelty of the work lies in integrating an ultrasonic homogenizer into a traditional vacuum casting machine and automating all stages of the process with the possibility of flexible parameter adjustment. For the first time, the author demonstrates the effect of ultrasound power on the strength of polyurethane under vacuum conditions. As a result of experimental tests, it is established that at an ultrasound power of 300 W, an optimal effect is achieved, the polyurethane strength increases by 60% compared to classical mixing. The developed control system and algorithms have ensured stability, reproducibility, and minimization of defects in the products. The conclusions drawn confirm the feasibility of introducing this technology into small-scale production of high-quality plastic parts.

**Keywords:** control system, software, ultrasonic homogenization, casting machine, polyurethane, plastic products

**For citation:** Prokudin G.Yu. Automating the Ultrasonic Homogenization Process of Polyurethane in a Vacuum Casting Machine. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 3 (29). pp. 4-12. doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-4-12.

## Введение

Современные требования к качеству и функциональным характеристикам пластмассовых деталей, используемых в машиностроении, медицине, электронике и других отраслях, предъявляют всё более высокие требования к прочностным свойствам материалов. Одним из таких широкоприменяемых материалов являются полиуретаны, получаемые в результате реакции между полиолами и изоцианатами. Структура и свойства конечного полимера в значительной степени зависят от качества смешивания компонентов на стадии преполимеризации.

Традиционные методы смешивания, включающие механическое перемешивание и лопастные смесители, часто не обеспечивают должной однородности при работе с химическими реагентами с ограниченным временем реакции. Особенно это актуально для реакции образования полиуретана, где «время жизни» смеси составляет около одной минуты. В данных технологических условиях предложено применение ультразвукового гомогенизирования, которое позволяет не только улучшить диспергирование компонентов, но и ускорить химическую реакцию за счёт кавитационных эффектов.

Дополнительным фактором, существенно влияющим на качество получаемых изделий, является проведение процесса в вакуумной среде. Совмещение ультразвукового гомогенизирования в вакууме позволяет исключить образование воздушных включений и повысить прочностные характеристики полимера. Однако применение этой многопараметрической технологии требует высокой степени автоматизации, учитывая точность дозирования, контроль температурного режима и согласование фаз ультразвукового воздействия и дегазации.

Настоящая статья посвящена разработке и исследованию автоматизированной системы ультразвукового гомогенизирования в вакуумной литьевой установки, ориентированной на мелкосерийное производство пластмассовых деталей из полиуретана. Рассматриваются технические аспекты интеграции ультразвукового узла, алгоритмы управления процессом, а также экспериментальные результаты, демонстрирующие улучшение физико-механических свойств изделий по сравнению с классической схемой смешивания [1, 2].

## Общее описание технологического процесса

1 этап. Вакуумирование рабочего объема камеры литьевой установки. Исключение воздушных пузырей, которые могут остаться в углублениях формы и привести к образованию дефектов на поверхности изделия. При интенсивном перемешивании и ультразвуковой обработке возможна дегазация компонентов, особенно если они склонны к влаго- и газопоглощению.

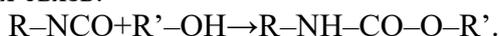
2 этап. Дозирование компонентов реакции. Реакция полиола и изоцианата – ключевая химическая реакция в производстве полиуретанов. Полиол – это органическое соединение, содержащее две или более гидроксильные группы (–ОН) на молекулу. Изоцианат – это соединение, содержащее одну или более изоцианатных групп (–N=C=O).

Характеристики конечного полиуретанового продукта зависят от молярного соотношения компонентов и их структуры: избыток изоцианата может привести к повышенной жестко-

сти и более плотной структуре; избыток полиола делает полимер более гибким и гидрофильным. Также варьируются длина цепи полиола, типы изоцианатов, наличие сшивающих агентов или катализаторов.

3 этап. Смешивание компонентов. Реакция между полиолом и изоцианатом является основным путем получения полиуретанов – полимеров, в структуре которых повторяющимися звеньями являются уретановые (карбаматные) группы. Эта реакция представляет собой поликонденсацию, где мономеры с двумя или более функциональными группами соединяются, образуя полимер с выделением тепла, но без побочных низкомолекулярных соединений (если исключить побочные реакции с влагой).

Суть процесса. Изоцианат ( $R-NCO$ ) – это соединение с высокой реакционной способностью за счёт электрофильного атома углерода, входящего в состав изоцианатной группы ( $-N=C=O$ ). Полиол ( $R'-OH$ ) содержит нуклеофильные гидроксильные группы ( $-OH$ ), способные атаковать карбонильный углерод изоцианатной группы. При соединении этих двух реагентов образуется уретановая связь:



Это реакция аддитивного характера (присоединение), и она может происходить уже при комнатной температуре, особенно в присутствии катализаторов.

Важные особенности. Не требует удаления побочных продуктов (в отличие от классической поликонденсации). Высокоэффективна – практически полный выход уретановых связей. Очень чувствительна к влаге, которая может вмешиваться в реакцию. Смешивание полиола и изоцианата с использованием ультразвукового гомогенизатора оказывает значительное влияние на ход реакции и свойства конечного полиуретана.

Основные эффекты и последствия такого подхода. Ультразвук вызывает кавитацию – образование и схлопывание пузырьков в жидкости. Это локально генерирует повышение скорости реакции: высокие температуры (до  $\sim 5000$  K); высокие давления (до сотен атмосфер); микроскопические струи и ударные волны.

Эти экстремальные локальные условия: увеличивают кинетику реакции между  $-OH$  и  $-NCO$ ; снижают индукционный период; могут позволить реакцию при более низких температурных режимах.

Улучшение диспергирования компонентов. Полиолы и изоцианаты часто имеют различную вязкость и полярность, что затрудняет их равномерное перемешивание. Ультразвуковое воздействие: обеспечивает мелкодисперсное смешивание на молекулярном уровне; повышает однородность реакционной среды; снижает вероятность образования областей с избытком одного из компонентов.

Более равномерное распределение функциональных групп. В результате гомогенизации: функциональные группы  $-OH$  и  $-NCO$  лучше сближаются; образуется полимер с равномерным распределением уретановых связей; уменьшается вероятность недореагировавших участков.

Влияние на морфологию и свойства полиуретана. При применении ультразвука: повышается плотность сшивки, если система допускает многокомпонентную реакцию; получают полиуретаны с более мелкой и однородной пористой структурой (в случае пен); может изменяться жесткость, модуль упругости, термостойкость и адгезия готового продукта.

4 этап. Заполнение литейной формы. После завершения стадии ультразвукового гомогенирования смеси полиола и изоцианата, полученная реакционная масса представляет собой однородный, мелкодисперсный, предварительно активированный состав, готовый к полимеризации. На данном этапе критически важно обеспечить контролируемое, равномерное и герметичное заполнение литейной формы с минимальными потерями, исключая образование пузырьков, именно поэтому процесс проходит в вакууме.

Перед началом заливки литейная форма уже находится в вакуумной камере, откачанной до давления порядка  $10 \dots 50$  мбар, что обеспечивает отсутствие воздушных включений в полости формы, предотвращение кавитации вне гомогенизатора при заливке. Удержание вакуума до окончания заливки особенно важно при работе с высоковязкими или быстро реагирующими смесями, где даже небольшие объемы воздуха могут нарушить формообразование [3 – 7].

## Технические характеристики и требования к системе автоматизированного управления

Автоматизированная литьевая установка предназначена для работы с полимерными материалами – реактопластами, которые требуют точного контроля технологических параметров для достижения высокого качества отливаемых изделий. Основные процессы, происходящие в установке, включают вакуумирование, дозирование компонентов, перемешивание и заливку в форму. Для всех этих процессов необходимы точные механизмы, управляемые электроникой и программным обеспечением.

*Электрическая система управления.* Электрическая система управления предназначена для управления всеми технологическими этапами: от дозирования и вакуумирования до ультразвукового гомогенизирования и заливки смеси в литейную форму. Она отвечает за контроль исполнительных механизмов (сервоприводов, вакуумного насоса, гомогенизатора, нагревательных элементов) и взаимодействие с датчиками (температуры, давления и т. д.), которые передают данные для анализа и управления процессом. Основные задачи электрической системы включают:

– контроль вакуума: вакуумирование среды смешивания и литья необходимо для исключения образования пузырьков воздуха в изделии, что особенно важно при работе с реактопластами. Электрическая система управления контролирует работу вакуумного насоса и поддерживает необходимое давление в камере;

– управление дозированием: автоматизированная литьевая установка должна точно дозировать компоненты полиуретана. Для этого используются шаговые двигатели и сервоприводы, управляющие перемешивающими механизмами;

– управление ультразвуковым гомогенизированием: для получения наиболее высоких прочностных свойств мощность гомогенизатора должна регулироваться с шагом не более 10 Вт.

– контроль температуры: для работы с реактопластами и термопластами необходимо точно поддерживать температуру компонентов. Система управления должна обеспечивать стабильный нагрев и охлаждение с минимальными отклонениями от заданных параметров.

На рис. 1 представлена электрическая схема, которая включает следующие основные составные части: 1 – плата управления (*Arduino Mega 2560*); 2 – персональный компьютер; 3 – блок питания напряжением 12 В; 4 – сервоприводы; 5 – модуль реле; 6 – датчик температуры; 7 – ультразвуковой гомогенизатор *HS-S20-500*; 8 – электроклапан; 9 – вакуумный насос; 10 – ТЭНы.

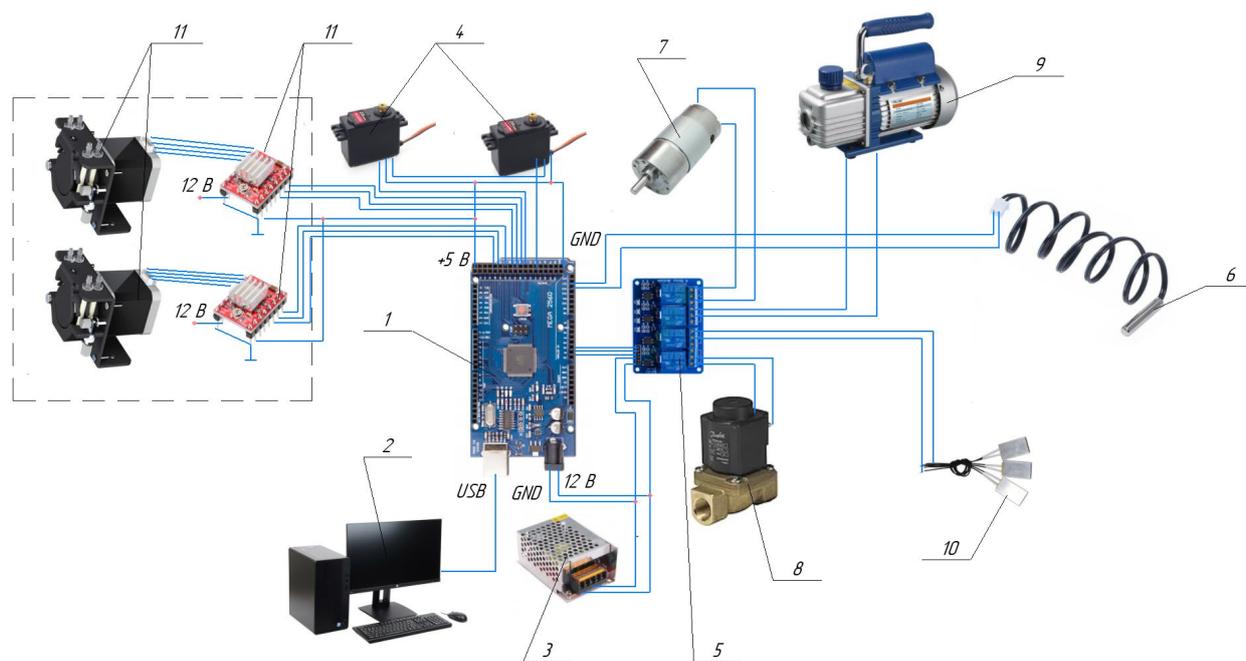


Рис. 1. Наглядная электрическая схема подключения  
*Fig. 1. Visual electrical connection diagram*

*Программное обеспечение.* Программное обеспечение автоматизированной литьевой установки выполняет две ключевые функции:

- 1) управление всеми этапами технологического процесса, включая дозирование, перемешивание, ультразвуковую гомогенизацию, вакуумирование и заливку смеси;
- 2) обеспечение интуитивного взаимодействия с пользователем через графический интерфейс, позволяющий контролировать, настраивать и диагностировать процесс в реальном времени.

Для реализации этих функций разработаны два компонента:

- 1) прошивка микроконтроллера, реализующая низкоуровневое управление оборудованием;
- 2) графический интерфейс пользователя (*GUI*), обеспечивающий доступ к параметрам и мониторингу работы установки.

*Прошивка микроконтроллера.* Прошивка написана на языке *C/C++* и выполняется на базе промышленного микроконтроллера, либо ПЛК. Она реализует ключевые алгоритмы управления физическими процессами, включая терморегулирование, управление приводами, вакуумной системой и блоком ультразвуковой гомогенизации.

Основные функции прошивки представлены ниже.

1. Контроль температуры. Получая данные с цифровых и аналоговых термодатчиков, микроконтроллер регулирует работу нагревателей в камере предварительного подогрева компонентов и в зоне заливки. Применяются ПИД-регуляторы с автонастройкой коэффициентов. Это особенно критично при работе с полиолами и изоцианатами, чувствительными к температуре.

2. Ультразвуковая гомогенизация. Встроенная поддержка управления УЗ-генератором по аналоговому каналу или через *Modbus/RS485*. Прошивка обеспечивает:

- регулировку мощности ультразвука;
- контроль частоты и режима (непрерывный/импульсный);
- мониторинг перегрева и вибрации;
- синхронизацию с вакуумированием для предотвращения кавитационного разрушения компонентов.

3. Управление сервоприводами и насосами. Микроконтроллер генерирует ШИМ-сигналы для управления сервоприводами дозаторов, мешалок и приводов подачи смеси. Регулируется скорость вращения и время работы в зависимости от заданного рецепта.

4. Контроль вакуума. Контролируется включение вакуумного насоса, открытие/закрытие клапанов, уровни давления в камере. Система поддерживает заданный уровень вакуума на протяжении всего цикла, особенно во время ультразвукового перемешивания и заливки.

*Пользовательский интерфейс.* Графический интерфейс рис. 2, разработанный на платформе *Delphi 10.3*, обеспечивает удобную визуализацию и управление всеми параметрами установки. Он отображается на сенсорной панели или ПК, подключённом по *Ethernet/USB*.

Возможности интерфейса:

1) настройка параметров процесса: температура компонентов, длительность и мощность ультразвуковой гомогенизации, вакуум, дозировка, скорость перемешивания, время выдержки;

2) мониторинг в реальном времени:

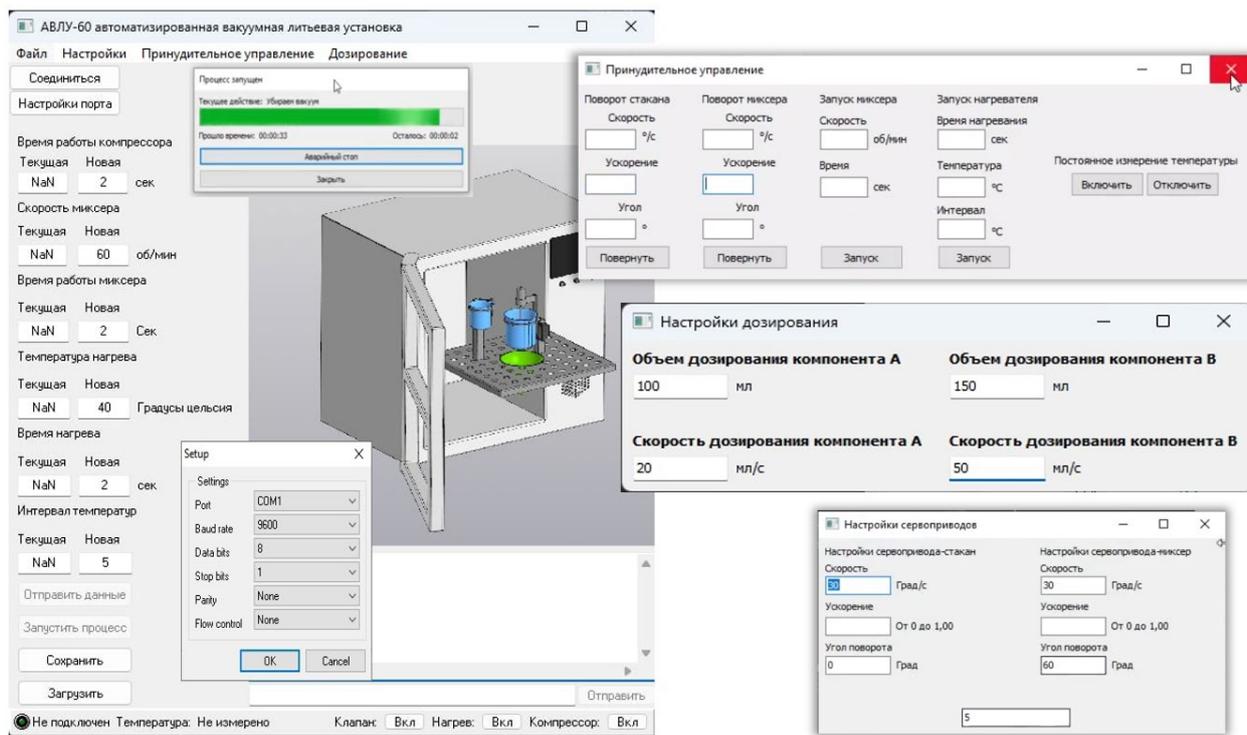
– отображение температуры, давления, мощности ультразвука, времени и текущей стадии цикла;

– анимации, графики и цветовые индикаторы для быстрого восприятия;

3) сохранение профилей: поддержка шаблонов (рецептов) для различных типов полиуретановых смесей и задач;

4) система журналирования: все действия оператора и состояния системы автоматически логируются с метками времени. Возможен экспорт журнала на *USB*-накопитель;

5) диагностика и ошибки: оповещения о перегреве, недостатке компонентов, отклонении давления, сбоях УЗ-блока. Встроенные рекомендации по устранению неисправностей.



**Рис. 2. Пользовательский интерфейс приложения**  
**Fig. 2. User interface of the application**

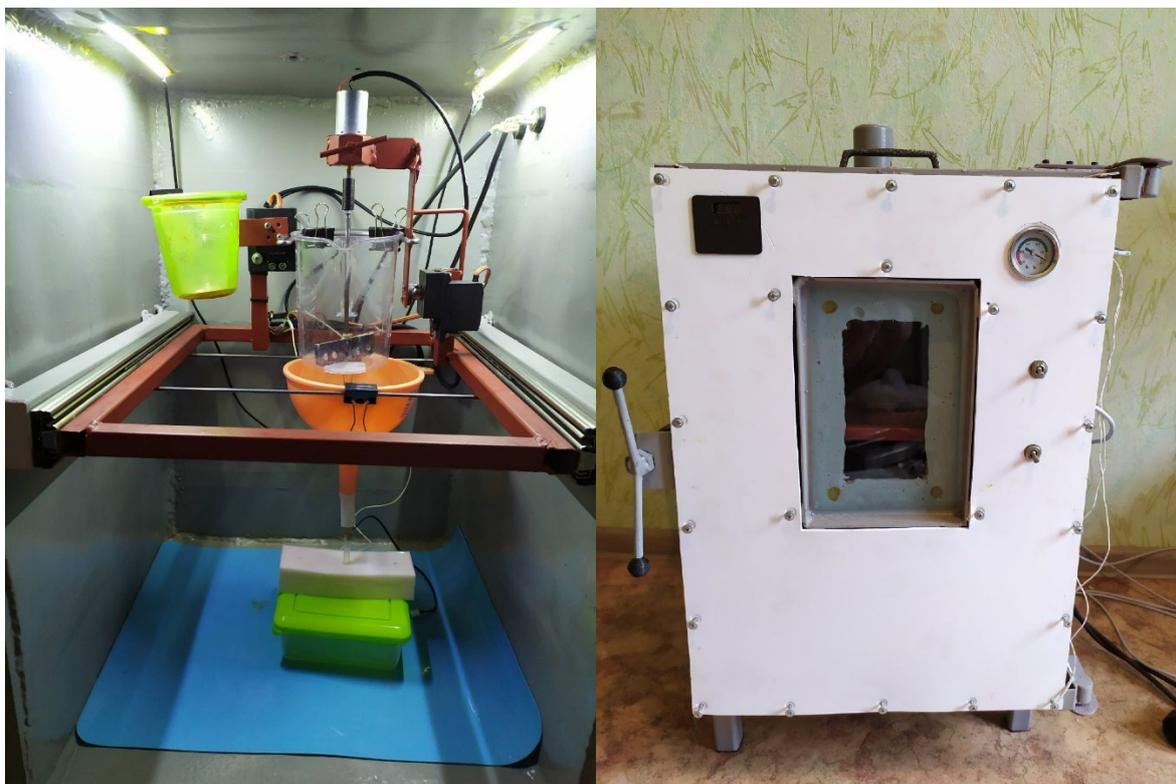
*Алгоритмы работы системы управления.* Программное обеспечение и электрическая система управления работают по следующему алгоритму:

- 1) подготовка установки
  - проверка подключения оборудования и наличия компонентов;
  - предварительный нагрев до заданных температур;
  - дегазация компонентов в вакуумной камере;
- 2) дозирование и перемешивание
  - автоматическое дозирование компонентов *A* (полиол) и *B* (изоцианат) в заданной порции;
  - предварительное механическое перемешивание;
  - включение ультразвукового гомогенизатора, параметры которого заданы в рецепте (мощность, длительность, режим);
- 3) заливка смеси
  - перевод вакуумной камеры в режим заливки;
  - открытие клапанов и подача смеси в форму;
  - контроль давления и объёма подачи;
- 4) полимеризация
  - удержание температуры в форме;
  - отсчёт времени выдержки согласно выбранному материалу;
  - уведомление оператора о завершении цикла.

Это обеспечивает полную автоматизацию процесса, минимизируя вмешательство оператора и повышая качество отливаемых изделий [8 – 12].

### **Экспериментальные исследования влияния ультразвукового гомогенизирования на прочностные характеристики полиуретана**

Целью настоящего эксперимента является количественная оценка влияния мощности ультразвукового гомогенизатора на прочностные характеристики полиуретана, получаемого в автоматизированной литьевой установке рис. 3. Особое внимание уделено взаимосвязи между ультразвуковыми параметрами обработки и изменением механических свойств, в частности – прочности на растяжение.



**Рис. 3. Лабораторный образец литьевой установки для реактопластов**  
**Fig. 3. Laboratory sample of injection molding machine for thermosetting plastics**

Применяемые материалы и оборудование: полиол и изоцианат (марка АДВ-14); ультразвуковой гомогенизатор лабораторного класса 20 кГц, регулируемая мощность 0...500 Вт (модель *HS-S20-500*); автоматизированная лабораторная вакуумная литьевая установка; универсальная электромеханическая испытательная машины *ТРМ-С10А1* (по ГОСТ 11262-2017 или *ISO 527-2:2012*) [13].

Процедура:

- 1) дозирование полиола и изоцианата (массовое соотношение 1:1,2), дегазация в вакууме 3 мин;
- 2) ультразвукового гомогенирования в течение 30-ти с при разной мощности: 0, 100, 200, 300, 400, 500 Вт;
- 3) после гомогенизации смесь заливалась в литьевую форму, находящуюся внутри вакуумной камеры;
- 4) отверждение проводилось при температуре 80 °С в течение 2-х часов;
- 5) испытания на растяжение.

Полученные данные в табл. 1 показывают, что при низкой мощности ультразвука (100...200 Вт) достигается частичное улучшение дисперсии компонентов, что ведёт к умеренному росту прочности. Однако максимальное улучшение наблюдается при мощности 300 Вт, где происходит наилучшая кавитационная дисперсия и активация реакционной смеси, без перегрева.

Таблица 1

**Результаты экспериментов**

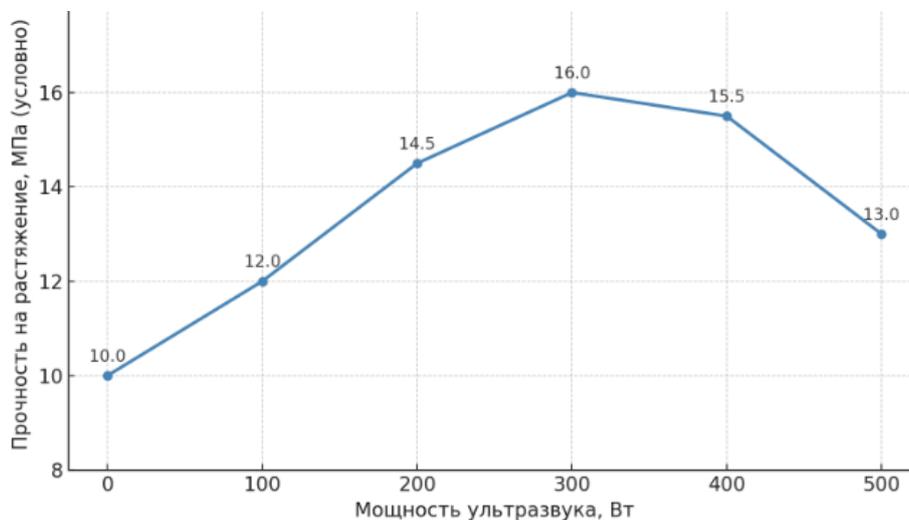
Table 1

*Experimental results*

	Мощность, Вт	Прочность, Мпа	Описание структуры
1	0	10,1	Наблюдаются макро-дефекты, неоднородность
2	100	12,3	Незначительное улучшение структуры
3	200	14,8	Явное уплотнение, равномерная структура
4	300	16,2	Оптимальная прочность, минимальная пористость
5	400	15,6	Начало деструктивного нагрева
6	500	13,2	Перегрев, признаки микропузырей и термодеструкции

При увеличении мощности до 400...500 Вт начинается деструктивное воздействие: интенсивная кавитация вызывает локальный перегрев, приводящий к: начальной термодеструкции; нестабильности вязкости; образованию микропузырей и частичному разложению изоцианатов.

Таким образом, существует оптимальное окно мощности рис. 4, в пределах которого улучшаются физико-механические характеристики полиуретана за счёт интенсификации межфазного взаимодействия без потери химической стабильности.



**Рис. 4. График зависимости прочностных свойств от мощности ультразвукового гомогенизатора**  
*Fig. 4. Graph of the dependence of strength properties on the power of the ultrasonic homogenizer*

Полученные данные показывают, что при низкой мощности ультразвука (100...200 Вт) достигается частичное улучшение дисперсии компонентов, что ведёт к умеренному росту прочности. Однако максимальное улучшение наблюдается при мощности 300 Вт, где происходит наилучшая кавитационная дисперсия и активация реакционной смеси, без перегрева.

При увеличении мощности до 400...500 Вт начинается деструктивное воздействие: интенсивная кавитация вызывает локальный перегрев, приводящий к начальной термодеструкции, нестабильности вязкости, образованию микропузырей и частичному разложению изоцианатов.

Таким образом, существует оптимальное окно мощности, в пределах которого улучшаются физико-механические характеристики полиуретана за счёт интенсификации межфазного взаимодействия без потери химической стабильности.

### Заключение

Проведённый анализ показал, что применение ультразвукового гомогенизирования в процессе смешивания полиола и изоцианата в условиях вакуумной литьевой установки является перспективным направлением для повышения качества полиуретановых изделий, особенно в условиях мелкосерийного производства. Кавитационные эффекты, возникающие в результате воздействия ультразвука, обеспечивают более тонкое и равномерное распределение компонентов, снижают вязкость смеси и минимизируют образование микродефектов, таких как воздушные включения или неполное сшивание.

Автоматизация данного процесса позволяет точно контролировать параметры технологического цикла – температуру, давление, время и интенсивность ультразвуковой обработки, что в совокупности повышает воспроизводимость и стабильность получаемых изделий. Разработанная система управления, включающая микроконтроллерную прошивку и графический пользовательский интерфейс, обеспечивает высокую степень надёжности, удобства эксплуатации и возможности адаптации под различные составы и технологические режимы.

Результаты экспериментальных исследований, включая анализ влияния мощности ультразвуковой обработки на прочность полиуретана, подтверждают целесообразность внедрения такой технологии в инженерную практику. Таким образом, автоматизированная ультразвуковая гомогенизация в вакуумной литьевой установке открывает новые возможности для получения высококачественных полиуретановых изделий с заданными механическими характеристиками и низким уровнем дефектности, что особенно актуально для современных отраслей, требующих точности, чистоты структуры и стабильности материалов.

### Список источников:

1. Ковалев А.В., Михайлов С.В. Основы переработки полиуретанов: монография. – М.: Химия, 2018. – 384 с.
2. Минаев В.А., Липатов Ю.С. Технология переработки пластмасс: учеб. пособие. – СПб.: Профессия, 2020. – 432 с.
3. Шехтер Б.З., Кузнецов И.А. Автоматизация химико-технологических процессов. – М.: Академия, 2019. – 288 с.
4. Мельников Е.М. Технологии формования пластиков в вакууме: справочник. – М.: Машиностроение, 2016. – 376 с.
5. Kim J.-Y., Kim J.-D., Kim J.-H., Kim S.-K., Lee J.-M. Effects of ultrasonic dispersion on nanoparticle based polyurethane foam reinforcement // *Polymer Testing*. – 2021. – Vol. 99. – P. 107210. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107210.
6. Sang L., Yang Y., Zhu C. Influence of ultrasonic mixing on the morphology and mechanical properties of polyurethane elastomers // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2020. – Vol. 65. – P. 104991. — DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.104991.
7. Zhang M., Xie J., Wu Z. Influence of cavitation energy on mixing of prepolymers and curing agents in polyurethane production // *Chemical Engineering and Processing*. – 2019. – Vol. 140. – P. 58-66. — DOI: 10.1016/j.ccep.2019.05.009.
8. Лапшин И.Г., Горбунов А.В. Промышленная автоматика и микропроцессорное управление. – М.: Лань, 2021. – 512 с.
9. Юдин А.Г., Егоров А.А. Сенсорные технологии в автоматизации производства. – М.: Наука, 2020. – 304 с.
10. Тарасов С.В., Зайцев И.В. Современные методы управления технологическими процессами в химической промышленности // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 72-79.
11. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022682698 от 25 ноября 2022 г. Российская Федерация. Программа контроллера опытного образца блока управления литьевой установкой для реактопластов / Г.Ю. Прокудин; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2022.
12. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022682696 от 25 ноября 2022 г. Российская Федерация. Приложение системы управления литьевой установкой для реактопластов / Г.Ю. Прокудин; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2022.
13. ГОСТ 11262–2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – Взамен ГОСТ 11262–80. – Введ. 2018-07-01. – М.: Стандартиформ, 2018. – 17 с.

### Информация об авторах:

#### Прокудин Герман Юрьевич

аспирант, младший научный сотрудник Волгоградского государственного технического университета, Scopus-Author ID 1222369

**Статья поступила в редакцию 03.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 02.07.2025.**

**The article was submitted 03.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 02.07.2025.**

**Рецензент** – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

**Reviewer** – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

### References:

1. Kovalev A.V, Mikhailov S.V. Fundamentals of Polyurethane Recycling. Moscow: Khimiya; 2018.
2. Minaev V.A., Lipatov Yu.S. Technology of Plastic Processing. St. Petersburg: Profession; 2020.
3. Shekhter B.Z., Kuznetsov I.A. Automation of Chemical Technological Processes. Moscow: Akademia; 2019.
4. Melnikov E.M. Technologies for Vacuum Forming of Plastics. Moscow: Mashinostroenie; 2016.
5. Kim J.-Y., Kim J.-D., Kim J.-H., Kim S.-K., Lee J.-M. Effects of Ultrasonic Dispersion on Nanoparticle Based Polyurethane Foam Reinforcement. *Polymer Testing*. 2021;99:107210. doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107210
6. Sang L., Yang Y., Zhu C. Influence of Ultrasonic Mixing on the Morphology and Mechanical Properties of Polyurethane Elastomers. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;65:104991. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.104991
7. Zhang M., Xie J., Wu Z. Influence of Cavitation Energy on Mixing of Prepolymers and Curing Agents in Polyurethane Production. *Chemical Engineering and Processing*. 2019;140:58-66. doi: 10.1016/j.ccep.2019.05.009
8. Lapshin I.G., Gorbunov A.V. Industrial Automation and Microprocessor Control. Moscow: Lan; 2021.
9. Yudin A.G., Egorov A.A. Sensor Technologies in Production Automation. Moscow: Nauka; 2020.
10. Tarasov S.V., Zaytsev I.V. Modern Methods of Managing Technological Processes in the Chemical Industry. *ChemChemTech*. 2021;64(4):72-79.
11. Prokudin G.Yu. Controller Program for the Experimental Sample of the Control Unit of the Casting Machine for Thermosets. Certificate of State Registration of Computer Program RF, no. 2022682698. Volgograd State Technical University; 2022 Nov 25.
12. Prokudin G.Yu. Application of the Control System of the Casting Machine for Thermosets. Certificate of State Registration of Computer Program RF, no. 2022682696. Volgograd State Technical University; 2022 Nov 25.
13. State Standard 11262-2017. Plastics. Determination of Tensile Properties. Instead of State Standard 11262-80. Moscow: Standartinform; 2018 Jan 1.

### Information about the authors:

#### Prokudin German Yurievich

Postgraduate student, Junior Researcher of Volgograd State Technical University, Scopus-Author ID: 1222369