

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 678.057.9

DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-244-249

Поступило в редакцию 25.10.2017

Received 25.10.2017

М. А. Ксенофонов

*Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ НАУКОЕМКИХ МАШИН ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

(Представлено академиком А. Ф. Чернявским)

Аннотация. В работе представлена концепция создания семейства эффективных машин и устройств для реализации технологий производства полимерных материалов с заданными свойствами, разработанных в результате комплексных физико-химических исследований структуры и свойств сложных органических соединений различной природы с использованием современных теоретических и экспериментальных физико-химических методов. Принципиальной основой предложенной мономерно-олигомерной технологии являются регулируемые процессы превращения реакционноспособных соединений в газонаполненные путем прямого перехода жидкой фазы в конденсированное состояние.

Ключевые слова: пеноуретаны, полиуретаны, полимерные композиты, смесительно-дозировочное и формующее оборудование, алгоритмы и программное обеспечение

Для цитирования: Ксенофонов, М. А. Создание эффективных наукоемких машин для производства изделий из полимерных композитов / М. А. Ксенофонов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 244–249. DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-244-249

Mikhail A. Ksenofontov

*Institute of Applied Physical Problems named after Sevchenko A. N. of the Belarusian State University, Minsk,
Republic of Belarus*

DESIGNING HIGH-PERFORMANCE KNOWLEDGE-BASED MACHINES FOR MANUFACTURE OF POLYMER COMPOSITE PRODUCTS

(Communicated by Academician Aleksandr F. Cherniavsky)

Abstract. The concept of designing a family of high-performance machines and devices is presented. This family is intended for the implementation of the production technologies of polymer materials with predetermined properties. The materials have been developed as a result of complex physical and chemical studies of the structure and properties of complex organic compounds with the use of modern theoretical and experimental methods. The principal basis of the proposed monomer-oligomeric technology is concerned with the controlled processes of reactive compound transformation into gas-filled ones by a direct liquid phase transition into a condensed state.

Keywords: foam, polyurethanes, polymeric composites, mixing-dosing and forming equipment, algorithms and software

For citation: Ksenofontov M. A. Designing high-performance knowledge-based machines for manufacture of polymer composite products. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 2, pp. 244–249 (in Russian). DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-2-244-249

Введение. Системный молекулярно-структурный анализ физико-химических превращений мономеров в полимеры позволил на различных технологических стадиях процесса выявить основные образующиеся фрагменты и установить общие закономерности влияния структуры на свойства материалов.

Научно-техническая база представленных в работе технологических процессов, оборудования и ресурсосберегающей продукции:

впервые теоретически обоснованный и реализованный на практике одностадийный процесс получения газонаполненных полимеров, в едином технологическом цикле которого происходит поликонденсация, вспенивание и отверждение реакционноспособных композиций [1; 2];

физико-химические представления о молекулярно-структурной организации газонаполненных полимеров и предложенные на этой основе наукоемкие технологические способы получения многофункциональных газонаполненных полимерных материалов [3; 4];

выявленные закономерности превращений реакционноспособных мономеров в сетчатые пенополимеры и разработанные оригинальные физические модели, адекватно отражающие реальные механизмы образования макромолекулярных фрагментов, являющихся основными структурными элементами газонаполненных полимеров [5];

специально созданные автоматизированные смесительно-дозировочные и формообразующие устройства, обеспечивающие реализацию эффективных технологических процессов¹;

оригинальные конструкторские и технические решения с использованием лучших мировых достижений в области материаловедения, машино- и станкостроения².

Основная часть. Установленные авторами закономерности физико-химических процессов формирования микро-, макромолекулярной структуры и свойств газонаполненных полимеров дали возможность создать и организовать серийное производство ранее не выпускаемых в Республике Беларусь широкого спектра импортозамещающих конструкций, изделий и устройств.

Принципы мономерно-олигомерной технологии, основанные на превращении реакционноспособных соединений в газонаполненные путем прямого перехода жидкости в конденсированное состояние реализованы разработкой оригинального эффективного смесительно-дозировочного и формообразующего оборудования.

Особые требования к оборудованию обусловлены жесткими временными ограничениями процессов смешения и подачи в формообразующие устройства композиций, широким диапазоном их соотношений и количеств, высокими адгезионными свойствами образующихся продуктов, необходимостью точного поддержания установленных технологических параметров для обеспечения получения изделия с заданными характеристиками.

Комплексы эффективных машин и устройств для производства из полимерных композитов изделий с определенными эксплуатационными свойствами должны обеспечивать равномерную подачу реагирующих компонентов в реакционную зону, точное поддержание со-



Рис. 1. Смесительно-дозировочная установка высокого давления

Fig. 1. High-pressure mixing-dosing device

¹ Установка заливочная смесительно-дозировочная: пат. 7634 Респ. Беларусь, МПК В 29С 67/20. / М. А. Ксенофонтов, С. В. Выдумчик, О. О. Гавриленко, С. А. Чупрынский, Т. Г. Павлюкевич; дата публ.: 30.10.11; Установка заливочная смесительно-дозировочная: пат. 10305 Респ. Беларусь, МПК В 29С 67/20. / М. А. Ксенофонтов, С. В. Выдумчик, О. О. Гавриленко, Т. Г. Павлюкевич, С. А. Чупрынский; дата публ.: 30.10.14.

² Смесительное устройство: пат. 9922 Респ. Беларусь, МПК В 29В 7/12, В 29В 7/40. / М. А. Ксенофонтов, С. В. Выдумчик, О. О. Гавриленко, Т. Г. Павлюкевич; дата публ.: 28.02.14; Смесительное устройство: пат. 20889 Респ. Беларусь, МПК В 29В 7/12, В 29В 7/40. / М. А. Ксенофонтов, С. В. Выдумчик, О. О. Гавриленко, Т. Г. Павлюкевич; дата публ.: 03.10.16.

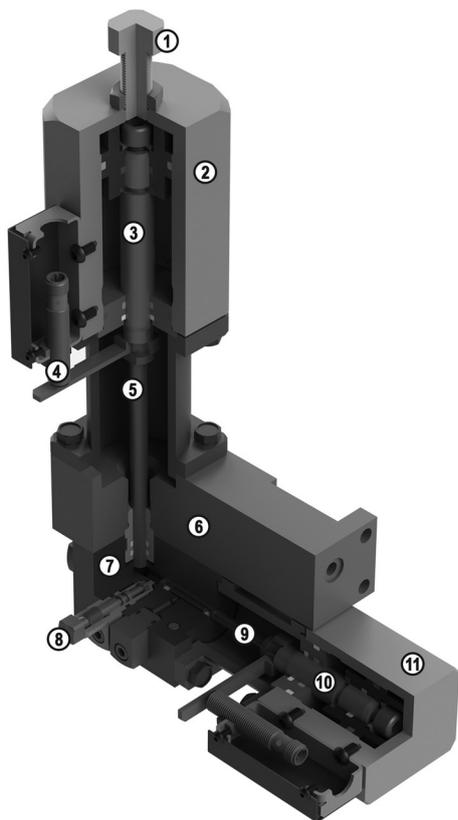


Рис. 2. Смесительное устройство высокого давления: 1 – винт регулировочный; 2 – цилиндр вертикальный; 3, 5, 9 и 10 – шток; 4 – датчик конечного положения; 6 – пластина; 7 – корпус; 8 – игла; 11 – цилиндр горизонтальный

Fig. 2. High-pressure mixing device: 1 – adjusting screw; 2 – vertical cylinder; 3, 5, 9 and 10 – rod; 4 – final position transducer; 6 – plate; 7 – body; 8 – needle; 11 – horizontal cylinder

Смесительную камеру, образуя при соударении турбулентный поток с множеством завихрений, что обеспечивает интенсивное перемешивание реакционной смеси в процессе поступления ее через выходное сопло в форму. После окончания заливки шток опускается и прерывает подачу компонентов в камеру смешения, одновременно производя ее очистку.

Созданы смесительно-дозировочные установки низкого давления для производства всех типов воздушных, масляных, топливных фильтров автотракторной и авиационной промышленности (рис. 3).

В их состав входят: насосы-дозаторы с электроприводами, смесительное устройство, емкости с мешалками для компонентов и растворителя, устройство насыщения компонентов воздухом, термостат, пульт управления, поворотная стойка, пневморегулирующая аппаратура и контрольно-измерительные приборы.

Основными компонентами смесительного устройства низкого давления (рис. 4) являются металлический корпус смесительной камеры, мешалки и пневмоцилиндр. Устройство характеризуется универсальностью, т. е. возможностью переработки различных композиций в широком интервале вязкостей и массовых соотношений компонентов, обеспечивает высокое качество смешения и возможность литья в открытые формы.

Данные смесительные устройства применяются на установках с общей производительностью от 1 до 10 000 г/с и соотношением компонентов от 1×1 до 1×10 и вязкостью исходных компонентов от 10 до 150000 мПа·с. Компоненты в заданном соотношении подаются в смеси-

отношения между реагирующими компонентами, строгое соблюдение временных параметров подачи и смешения реагирующих компонентов, заданной температуры исходных реагирующих компонентов.

Разработанные оригинальные конструкторские и инженерные решения с использованием микропроцессорной техники и специальных информационно-аналитических и логических программ позволили создать многофункциональные и высокопроизводительные автоматизированные машины, которые по своим технико-экономическим характеристикам не уступают лучшим зарубежным аналогам. В их числе смесительно-дозировочные установки высокого давления и формующее оборудование для производства многофункциональных сорбентов нефтепродуктов и эффективной изоляции трубопроводов магистральных и коммунальных тепловых сетей, газо-, нефтепроводов, технологического оборудования (рис. 1).

Смесительное устройство высокого давления (рис. 2) состоит из металлического корпуса с цилиндрической смесительной камерой и инжекционными соплами, распределительного плунжера для очистки смесительной камеры, выполняющего также роль распределительного элемента (переключателя потоков).

Смесительная камера представляет собой цилиндрический корпус диаметром от 12 до 20 мм, в который установлены два инжекционных сопла диаметром от 0,7 до 4,0 мм. В исходном положении смесительная камера перекрыта штоком с рециркуляционными каналами, обеспечивающими раздельное движение компонентов по технологическим трубопроводам установки. При подъеме штока подаваемые дозирующим устройством компоненты под давлением 12–25 МПа через инжекционные сопла со скоростью 100–200 м/с одновременно поступают в смесительную камеру.

тельный узел для их механического перемешивания.

В смесительно-дозировочных установках функции слежения за режимами работы всех узлов, поддержания заданных технологических параметров и защитно-блокировочных операций осуществляются оригинальной системой автоматизированного управления (САУ) со специально разработанным информационно-аналитическим программным обеспечением.

САУ включают в себя следующие основные элементы: управляющий контроллер на основе микропроцессора, частотные преобразователи для управления оборотами электродвигателей привода насосов дозирующего узла, устройства ввода-вывода информации, устройства защиты, автоматики и управления силовых электрических цепей, датчики измерения температуры компонентов, давления в гидравлической и пневматической системах, преобразователи угловых перемещений, установленные на валах насосов дозирующего узла, комплект исполнительных механизмов (электрореле, электродвигатели, термоэлектрические нагреватели).

Быстродействующий 8-разрядный микропроцессор с многоканальным АЦП осуществляет преобразование входных аналоговых сигналов в цифровую форму, реализует функции пропорционально-интегрально-дифференциального управления по результатам математической и логической обработки информационных данных.

Визуализация основных технологических параметров и режимов осуществляется удобным интерфейсом оператор-машина с использованием алфавитно-цифрового жидкокристаллического дисплея и светодиодных индикаторов. В качестве датчиков температуры применены платиновые или медные преобразователи термосопротивления, обеспечивающие измерение температурных параметров с точностью $\pm 0,5$ °С в сочетании с высокой надежностью и низкой стоимостью.



Рис. 3. Смесительно-дозировочная установка низкого давления

Fig. 3. Low-pressure mixing-dosing device

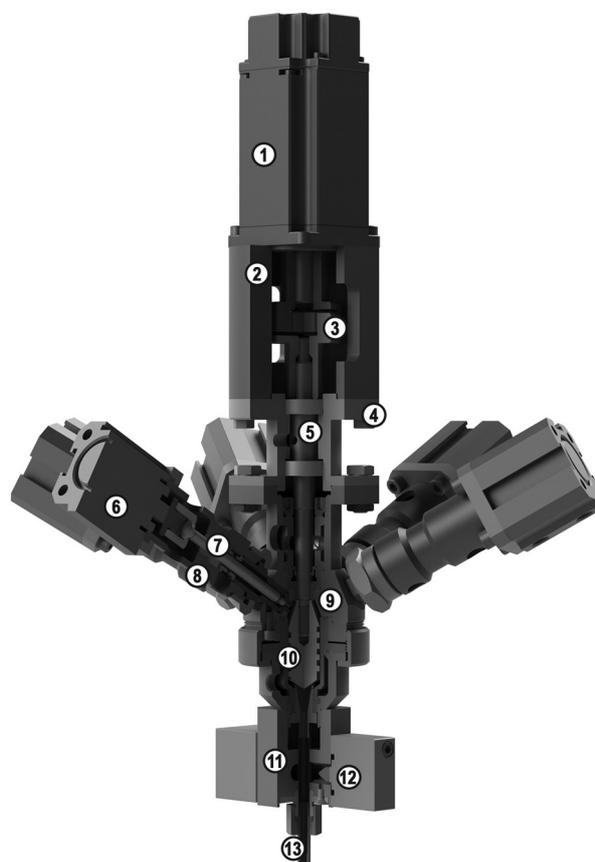


Рис. 4. Смесительное устройство низкого давления: 1 – серводвигатель; 2 – стакан; 3 – муфта; 4 – корпус подшипников; 5 – вал с подшипниками; 6 и 12 – пневмоцилиндр; 7 – плунжер; 8 – клапан; 9 – корпус; 10 – ротор; 11 – отсекатель; 13 – сопло

Fig. 4. Low-pressure mixing device: 1 – servo-motor; 2 – glass; 3 – clutch; 4 – bearing body; 5 – bearing-equipped shaft; 6 and 12 – air cylinder; 7 – plunger; 8 – valve; 9 – body; 10 – rotor; 11 – cutter; 13 – nozzle

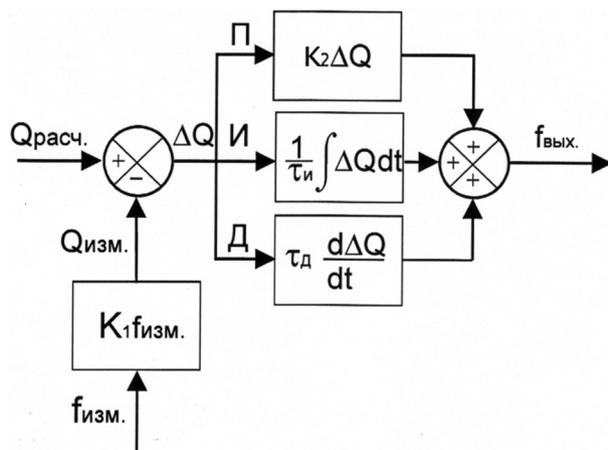


Рис. 5. Структурная схема

Fig. 5. Structural scheme

тров. Далее микропроцессор изменяет значение частоты вращения электродвигателя согласно данным измерения производительности подачи компонента $Q_{\text{изм}}$, поступающим с датчика обратной связи (преобразователь угловых перемещений), используя функцию ПИД-регулятора (рис. 5).

Работа ПИД-регулятора строится следующим образом. Выходной сигнал $f_{\text{вых}}$ состоит из суммы трех составляющих: пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д).

Пропорциональная составляющая (П) представляет собой результат умножения отклонения ΔQ на коэффициент K_2 , который задается программой, исходя из механических параметров привода. В результате проведенных исследований установлено, что при применении только пропорционального регулирования в случае оптимальной скорости отработки отклонения в системе возникают колебания Q порядка $\pm 3\%$.

С целью обеспечения точности и поддержания устойчивости в структуру регулятора введена интегральная составляющая (И), которая представляет собой результат умножения интеграла ΔQ на коэффициент, зависящий от постоянной времени интегрирования $\tau_{\text{и}}$. Введение интегральной составляющей позволило уменьшить ошибку отработки в установившемся режиме.

Для уменьшения времени реакции системы на возмущение с сохранением устойчивости в структуру регулятора введена дифференциальная составляющая (Д), которая представляет собой дифференциал отклонения ΔQ , умноженный на постоянную времени дифференцирования $\tau_{\text{д}}$. Введение дифференцирующей составляющей внесло демпфирование в систему, повысило ее устойчивость.

Использование оптимальных значений постоянных ПИД-регулятора позволили создать регулирующие системы с точностью настройки и поддержания производительности подачи компонентов $\pm 0,5\%$. Все функции ПИД-регулятора реализованы на уровне программного обеспечения микропроцессора САУ.

Заключение. Разработанные эффективные машины внедрены (более 150 единиц) на промышленных предприятиях Республики Беларусь, России, Украины, Литвы и Австрии, с помощью которых реализованы технологии производства полимерных материалов с заданными свойствами, в том числе смесительно-заливочные установки низкого давления, используемые для производства всех типов воздушных, масляных, топливных фильтров автотракторной и авиационной промышленности.

Смесительно-дозировочные установки высокого давления используются для производства пенополиуретановой изоляции трубопроводов магистральных и коммунальных продуктопроводов. Теплоизоляционные изделия из пенополиуретанов являются наиболее эффективными теплосберегающими материалами и характеризуются самым низким коэффициентом теплопроводности ($0,020\text{--}0,027\text{ Вт/м}^{\circ}\text{С}$) в широком интервале температур от -190 до $+150\text{ }^{\circ}\text{С}$, высокой прочностью, небольшим водопоглощением, биологической и химической стойкостью.

С использованием тензодатчиков и микроконтроллеров разработаны и изготовлены измерители давления, которые обеспечивают возможность программировать и с высокой точностью регулировать нижние и верхние значения давления, обеспечивая необходимую защиту установок от несанкционированных режимов работы.

Производительность насосов регулируется путем изменения скорости вращения приводного электродвигателя с помощью частотного преобразователя, для чего создано специальное программное обеспечение.

Микропроцессор рассчитывает величину производительности $Q_{\text{расч}}$ подачи компонента, исходя из заданных технологических парамет-

Кроме того, смесительно-дозировочные установки высокого давления обеспечивают получение многофункциональных сорбентов нефтепродуктов. По сравнению с лучшими мировыми аналогами разработанный сорбент превосходит их по ряду технико-эксплуатационных характеристик: сорбционная емкость материала по легким фракциям нефтепродуктов составляет более 70 кг/кг; время плавучести в насыщенном состоянии и способность удерживать поглощенные нефтепродукты не ограничены. Сорбционный материал обладает гидрофобными свойствами и с водных поверхностей поглощает исключительно нефть и жидкие углеводороды, практически не поглощая при этом воду.

Список использованных источников

1. Ксенофонтов, М. А. Физико-химические процессы формирования макромолекулярной структуры и свойств газонаполненных полимеров / М. А. Ксенофонтов // Выбр. науч. працы БГУ. – Минск: Изд. центр БГУ, 2001. – Т. 4. – С. 435–453.
2. Ксенофонтов, М. А. Газонаполненные полимеры. Наука, технология, применение / М. А. Ксенофонтов. – Минск: Изд. центр БГУ, 2002. – С. 18.
3. Газонаполненные полимеры – новые материалы и оборудование для их производства / М. А. Ксенофонтов [и др.] // Изв. Белорус. инженерн. акад. – 2005. – № 1 (19). – С. 56–62.
4. Физико-химические и спектрально-структурные свойства газонаполненных фенольных полимеров / М. А. Ксенофонтов [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2006. – С. 12.
5. Ксенофонтов, М. А. Пенополиуретаны. Структура и свойства / М. А. Ксенофонтов // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 3. – С. 48–52.

References

1. Ksenofontov M. A. Physical and chemical processes of formation of the macromolecular structure and properties of gas-filled polymers. *Uybranyya navukovyuya pratsy BGU [Selected scientific works of BSU]*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University, 2001, vol. 4, pp. 435–453 (in Russian).
2. Ksenofontov M. A. *Gas-Filled Polymers. Science, Technology, Application*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University, 2002, pp. 18 (in Russian).
3. Ksenofontov M. A., Ostrovskaya L. E., Khatenko A. S., Umreiko D. S. Gas-Filled Polymers – New Material and Equipment for their Manufacture. *Izvestiya Belorusskoi inzhenernoi akademii [Proceedings of the Belarusian Academy of Engineering]*, 2005, no. 1(19), pp. 56–62 (in Russian).
4. Ksenofontov M. A., Ostrovskaya L. E., Khatenko A. S., Umreiko D. S. *Physical-Chemical and Spectral-Structural Properties of Gas-Filled Phenol Polymers*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University, 2006, pp. 12 (in Russian).
5. Ksenofontov M. A. Polyurethane Foams. Structure and Properties. *Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika = Vestnik BSU. Series 1: Physics. Mathematics. Informatics*, 2011, no. 3, pp. 48–52 (in Russian).

Информация об авторе

Ксенофонтов Михаил Александрович – д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lab_doзатор@mail.ru.

Information about the author

Ksenofontov Mikhail Alexandrovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant professor, Head of Laboratory. Institute of Applied Physical Problems named after Sevchenko A. N. of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lab_doзатор@mail.ru.