

УДК 621.865.5

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ
ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИОННОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ РАЗНОРОДНЫХ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Дядичев В. В.¹, Гутько Ю. И.², Колесников А. В.^{2}*

¹*Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия*

²*Луганский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск 91034*

**E-mail: angeykov@mail.ru*

В научной статье представлены основные цели, которые могут быть достигнуты за счет точного измерения давления, развиваемого экструдером при переработке разнородных вторичных полимерных материалов. К ним относятся: более точное проектирование экструзионных машин, уточнение и проверка адекватности математических моделей расчета рабочих процессов экструзии, оперативная защита привода экструдера и экструзионной головки от избыточного давления. Первым, предлагаемым методом измерения давления, развиваемого экструдером, является определение степени деформации патрубка экструдера. Данный метод воплощается в виде датчика давления, реализованного на основе магнитометрического преобразователя, представляющего собой кольцевой электромагнит и феррозондовый магнитометр. Вторым методом является измерение реакции упорного подшипника экструдера, который реализуется в виде магнитоупругого преобразователя. Третьим методом является измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока экструдера и пересчета данного значения в комплексе с другими параметрами в давление, развиваемое экструдером. В работе представлены рекомендации по использованию, предложенных методов измерения давления в рабочем процессе экструзии.

Ключевые слова: экструдер, разнородные вторичные полимерные материалы, давление, деформация патрубка, магнитометрический преобразователь, электромагнит, магнитометр, реакция упорного подшипника, магнитоупругий преобразователь, сила тока якоря двигателя постоянного тока.

PACS: 98.80. ± k

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существующие технологические схемы переработки разнородных отходов полимерных материалов не позволяют эффективно и оперативно влиять на качество готового изделия из вторичных полимеров [1–5]. Это обусловлено общим упрощенным двустадийным подходом к решению сложной проблемы подготовки однородной смеси из отходов полимерных материалов различного типа и ее последующей переработки, отсутствием совершенных конструкций экструзионного оборудования, способного перерабатывать смеси из разнородных отходов полимеров и автоматизированных систем управления всем технологическим процессом, базирующихся на новых принципах и методах управления, современных компьютерных средствах управления [6–8].

Нам представляется необходимым сегодня развить и дополнить эти исследования с учетом существующих достижений в области обработки полимерных материалов давлением, конструирования, алгоритмизации, новых

требований к технологическим функциям экструзионного оборудования.

Одной из интересных научных задач, требующих решения в рамках озвученной проблемы, является измерение давления, развиваемого в процессе экструзионной переработки. Точное измерение данной величины позволит повысить эффективность проектирования технологического процесса и оборудования, функционирования системы управления, а также повысить качество производимых изделий с использованием вторичных материалов.

1. ЦЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗНОРОДНЫХ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Измерение давления, развиваемого экструдером, (или противодействия со стороны экструзионной головки) необходимо производить с расчетом на следующие цели использования полученного значения:

- ✓ проектирование экструзионных машин. Механическая часть экструдера сравнительно проста, однако аналитическое определение перепада давления в экструзионной головке является достаточно сложным и нами не обнаружены публикации, освещающие погрешность такого расчета. При расчете мощности привода экструдера в процессах экструзии необходимо рассчитать давление, которое должен развивать экструдер при продавливании полимерного расплава через головку. В то же время точный расчет противодействия в каналах экструзионной головки необходим для оптимального конструирования экструзионной установки и определения технологических режимов. Наличие датчика давления позволит произвести исследования по выявлению зависимостей $P = f(N)$, $P = f(T)$ для различных полимеров. Результаты которых могут использоваться при последующем проектировании аналогичных машин.
- ✓ уравнения, применяемые для описания реологии полимеров также имеют погрешность. В том числе практически не существует методик, определяющих изменение реологических характеристик в зависимости от кратности переработки полимера, а одно из направлений применения экструзионной технологии – утилизация полимерных отходов. Эти факторы отражаются на адекватности моделирования процессов экструзии и определении технологических параметров процесса [9–12].
- ✓ защита электродвигателя экструдера и его вращающихся частей от большого момента сопротивления, вызванного избыточным давлением; защита экструзионной головки от избыточного давления.

Таким образом указанные три причины контроля давления являются достаточно весомыми и, кроме того, при дальнейшем исследовании процесса и параметра давления могут быть найдены другие цели измерения и использования его значения.

Приведенные цели доказывают необходимость измерения давления, развиваемого экструдером в процессе экструзии.

2. КОСВЕННО-БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Давление во всех системах измеряется косвенно. Методы контроля, используемые для жидкостей: гидростатические, мембранные, в данном случае неприемлемы. Ввиду практической невозможности применения гидростатических методов из-за высоких величин давления, конструктивной невозможности и перехода вязкотекучего полимера в твердое состояние при уменьшении температуры во время отключения установки. Контактные мембранные методы неприемлемы из-за конструктивных соображений и, снова, перехода полимера из одного состояния в другое. Существенное неудобство также возникает от высокой температуры полимера в расплавленном состоянии (до 200 °С) [13–15].

Из перечисленных ограничений необходимо сделать вывод о том, что величину давления, развиваемого экструдером необходимо измерять косвенно и бесконтактно. Кроме того, целесообразно ориентироваться на электрический сигнал для передачи электронную систему управления [16–20].

Для расплавленного полимера под давлением, т.е. на выходе из экструдера, справедлив закон Паскаля: “Внешнее давление на жидкость или газ передается во все стороны равномерно”. Этот постулат необходимо положить в основу косвенно-бесконтактных методов измерения давления экструдера.

При продавливании расплава через каналы головки в следствии значительного гидравлического сопротивления каналов и высокой вязкости материала на входе в головку (т.е. после шнека) развивается давление, достигающее иногда 40 МПа. Это давление воздействует на подводящий патрубок (между экструдером и головкой). Давление пластика обеспечивается соответствующим крутящим моментом двигателя экструдера, которому пропорциональна сила тока якоря двигателя постоянного тока экструдера. Вследствие давления после шнека возникает значительное осевое усилие, действующее на шнек и стремящееся переместить его к двигателю. Это усилие со шнека передается на втулку и далее – на упорный подшипник, с него на крышку и дальше через болтовые соединения на основание установки [21–24].

Исходя из отмеченного действия давления экструдера можно выделить следующие косвенно-бесконтактные методы его измерения:

- ✓ измерение деформации патрубка между экструдером и экструзионной головкой;
- ✓ изменение осевого усилия;
- ✓ измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока.

Рассмотрим возможности практической реализации каждого из предложенных методов измерения.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПАТРУБКА УСТАНОВКИ

Одним из наиболее эффективных методов измерения давления (до 50 МПа) при повышенной температуре (до 473 К) является косвенный метод измерения давления по степени деформации конструктивного элемента установки, например, ее патрубка, которая связана с величиной давления, развиваемого экструдером [25–30].

Достаточно высокие метрологические характеристики имеет датчик давления, реализованный на основе магнитометрического преобразователя, представляющего собой кольцевой электромагнит и феррозондовый магнитометр.

Принцип измерения давления состоит в следующем: после нанесения на ферромагнитный патрубок магнитной метки с помощью приставного электромагнита, феррозондовым преобразователем, размещенным вблизи поверхности патрубка, измеряется горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля, которая пропорциональна величине прогиба стенки патрубка.

4. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКЦИИ УПОРНОГО ПОДШИПНИКА ЭКСТРУДЕРА

Как ранее отмечалось цепь передачи осевого усилия на шнек, образуемого в результате давления на выходе из экструдера, следующая : шнек → упорная втулка → подвижное кольцо упорного подшипника → неподвижное кольцо упорного подшипника → крышка → болтовое соединение крышки с корпусом → корпус → основание. Особенности съема усилия: невозможно разорвать приведенную цепь, т.к. это приведет к нарушению конструктивной целостности механизма; нельзя снять усилие параллельно по конструктивным соображениям; ввести в цепь какой-либо упругий элемент в виде мембраны параллельно также нет возможности, т.к. конструкция не дает возможности осевым перемещениям.

Исходя из перечисленного выше можно сделать вывод о том, что для измерения осевого усилия необходимо вклинить в цепь передачи усилия упругий жесткий элемент, который служил бы и в качестве датчика осевого усилия, и в качестве жесткого звена в цепи передачи осевого усилия, т.е. это звено должно воспринимать усилие, реагировать на него и передавать его.

Подобными характеристиками обладают магнитоупругие преобразователи.

Принцип действия магнитоупругого преобразователя основан на использовании магнитоупругого эффекта, сущность которого заключается в изменении магнитной проницаемости и других магнитных свойств ферромагнитного тела под действием механических упругих деформаций.

Зависимость этих свойств от деформаций можно показать в виде зависимостей изменения магнитной проницаемости от напряжений и гистерезисных кривых для различных напряжений.

Магнитоупругий преобразователь спроектирован для восприятия нагрузки от неподвижного кольца упорного подшипника, реакции на нее и передачи на крышку экструдера.

5. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭКСТРУДЕРА

Увеличение противодействия в головке при экструзии вызывает увеличение давления, развиваемого экструдером за счет увеличения крутящего момента, развиваемого двигателем постоянного тока экструдера, что вызывает увеличение тока якоря двигателя, а, следовательно, потребляемой мощности из сети.

Измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока экструдера является достаточно заманчивым решением проблемы контроля давления, т.к. при этом отпадает необходимость в использовании преобразователя ввиду того, что сигнал о давлении уже является электрической величиной, при подаче которого в электронную систему управления его необходимо лишь понизить.

Необходимо лишь вывести зависимость выходной величины – тока от входной величины – давления. Поиск зависимости базируется на уравнении баланса мощностей: производимой и потребляемой экструдером, с дальнейшим переходом от момента на валу шнека машины к силе тока двигателя постоянного тока экструдера. Полученная зависимость, для исследуемой машины, имеет следующий вид:

$$P = \frac{CE \cdot \Phi \cdot I_{я} \cdot \eta_{\text{экс}} \cdot \pi}{5,61 \cdot 10^{-5}} - 7,5 \cdot 10^4 \cdot m_0 \cdot e^{-0,01(T-T_0)} \cdot (31,416 \cdot N)^n, \quad (1)$$

где P – давление, развиваемое экструдером;

CE – константа двигателя постоянного тока;

Φ – магнитный поток возбуждения;

$\eta_{\text{экс}}$ – к.п.д. экструдера;

$I_{я}$ – ток якоря двигателя постоянного тока;

m_0 – константа вязкости;

T_0 – температура измерения константы вязкости;

T – температура расплава;

n – показатель текучести;

N – частота вращения двигателя.

Зависимость достаточно сложна, но при централизованной системе управления параметры N , $I_{я}$, T будет просто необходимо контролировать для целей контроля и управления, т.е. они будут известны, остальные параметры постоянны при следующих допущениях: постоянстве $\eta_{\text{экс}}$ при достаточно больших значениях давления; постоянстве Φ , т.е. при условии, что двигатель постоянного тока экструдера имеет независимое возбуждение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные выше методы контроля могут в равной степени использоваться при контроле давления в экструзионных машинах, однако существуют определенные рекомендации. Измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока экструдера

возможен при использовании в централизованной микропроцессорной системе управления, ввиду сложностей расчета. Измерение реакции подшипника при внедрении требует существенных изменений в конструкции крышки и корпуса; приемлемо лишь при создании новых машин в промышленном производстве. Измерение деформации патрубка экструдера возможно использовать при доработки существующей модели под контроль давления.

Список литературы

1. Rauwendaal C. Melting, Theory for Temperature-Dependent Fluids, Exact Analytical Solution for Power Law Fluids // *Adv. Polym. Techn.* 1992. No. 11. Pp. 19–25.
2. Rauwendaal C., Ingen Housz J. F. // *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 1990. No. 9, Pp. 583–601.
3. Быстров Г. А., Гальперин В. М., Титов Б. П. Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс. Ленинград, 1982.
4. Дядичев В. В., Локотош Б. Н., Леваничев В. В. Моделирование процессов соэкструзии. Луганск, 1998.
5. Дядичев В. В. Переработка отходов полимерных материалов методом соэкструзии. Луганск, 2003.
6. Дядичев В. В. Экструзия вторичных полимеров. Луганск, 2003.
7. Каган Д. Ф., Гуль В. Е., Самарина Л. Д. Многослойные и комбинированные пленочные материалы. Москва, 1989.
8. Калиновская Г. Д. Пути переработки отходов слоистых пластиков. Ленинград, 1997.
9. Reitemeyer P. Coextrusions werkzeuge zum Herstellen von Flachfolien fur den Verpackung sbereich // *Kunststoffe.* 1988. Vol. 78, No. 5. Pp. 395–397.
10. Nissel F. R., Split barrier and modules feed block systems // *Coextrusion V, SPE Regional Technical Conference, Arlington, Oct. 1989.*
11. Perdikonlias J., Petric J., Annuler Coextrusion Die Cherts New Territory // *PM & E.* 1992. No. 9. Pp. 35–39.
12. Auffermann A. Coextrudierte Verbuwdfolien, Coextrudierte Folien und Pletten, Dussldorf // *VDI, Verheg.* 1990. Pp. 11–32.
13. Nichols R. J., Kheradi F., *Modern Plastics.* 1984.
14. Luker K. Paper presented at the Continuous Compounding Conference, Beachwood, Ohio, 2000.
15. Shahinpoor M. // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1983. No. 12. Pp. 31–38.
16. Brinkschroeder F. J., Johannaber F. // *Kunststoffe.* 1981. No. 71, Pp. 138–143.
17. Rauwendaal C. Melting Theory for Temperature-Dependent Fluids, Exact Analytical Solution for Power Law Fluids // *Adv. Polym. Techn.* 1992. No. 11. Pp. 19–25.
18. Davis B., Grooved Feed Single Screw Extmders – Improving Productivity and Reducing Viscous Heating Effects // *Polym. Eng. Sci.* 1998. Vol. 38. No. 7. Pp. 1199.
19. U.S. Patent 5,909,958. Screw Extruder with Adjustable Groove Depth / C. J. Rauwendaal // 1999.
20. Elemans P., van Wunnik J. M., The Effect of Feeding Mode on the Dispersive Mixing Efficiency in Single-Screw Extrusion // *Proc. SPE ANTEC, 2000.* Pp. 265–267.
21. Fogarty J., Rauwendaal C. J., Fogarty D., Rios A. Turbo-Screw, New Screw Design for Foam Extrusion // *SPE ANTEC Techn. Papers.* 2001.
22. Kwon T. H., Joo J. W., Kim S. J., Kinematics and Deformation Characteristics as a Mixing Measure in the Screw Extrusion Process // *Polym. Eng. Sci.* 1994. Vol. 34. No. 3. Pp. 174–189.
23. Ingen Housz J. F., Meijer H. E. // *Polym. Eng. Sci.* 1981. No. 21. Pp. 352–359.
24. Perdikonlias J., Wybenga W. The development of a new coextrusion die for tubuler film // *TAPPI Pilymers, Laminations & Coatings Conference, San Diego, Sept. 1991.*

25. Migauchi N., Saito N., Osada Y., Experimental study on multilayer shut coextrusion using feedback method // JSW Technical Review. 1990. No. 14. Pp. 103–108.
 26. Kies J. Coextrusion von Folier Reihe Kunststofftechnik. VDI-Verlag, Dusseldorf, 1996.
 27. Han C. D. Multiphase flow in polymer processing. New York: Academic Press, 1981.
 28. Dooley J., Dietsche L., Numerical simulation of viscoelastic polymer flow – effects of secondary Flows in multilayer coextrusion // Plastics engineering. 1995. No. 4. Pp. 37–39.
 29. Schrenk W. J., Veazely E. W. Films, Multilayer, London // Enc. Polym. Sci. Eng. 1987. No. 7, Pp. 106–127.
 30. Hegel R. Coextrusion flow molding of large hollow articles // Coex. Europe. 1986. Pp. 385–389.
-

**IMPROVEMENT OF METHODS OF MEASUREMENT VALUES PRESSURE IN
THE PROCESS THE PROCESS OF EXTRUSION PROCESSING
HETEROGENEOUS SECONDARY POLYMERIC MATERIALS**

Dyadichev V. V.¹, Gytko U. I.², Kolesnikov A. V.^{2}*

¹ *Institute of Physics and Technology, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia*

² *Lugansk National University named after Vladimir Dal, Lugansk 91034*

**E-mail: angevkav@mail.ru*

In the scientific article the main goals that may be achieved by accurate measurement of pressure, developed by the extruder during processing secondary dissimilar polymeric materials. These include a more precise design of extrusion machines, specification and verification of the adequacy of mathematical models for calculating the working extrusion processes, operational protection of the extruder drive and extrusion die from excessive pressure. First, the proposed method of measuring the pressure, developed by the extruder, is to determine the degree of deformation of the extruder nozzle. This method is embodied as a pressure sensor, a magnetometric implemented based transducer is an annular electromagnet and a fluxgate magnetometer. A second method is to measure the reaction extruder thrust bearing, which is realized in the form of a magnetoelastic transducer. The third method is to measure the amperage DC extruder motor armature current and the conversion of values in combination with other parameters in the pressure developed by the extruder. The paper presents the recommendations for the use proposed by measuring the pressure in the working methods of the extrusion process.

Keywords: extruder, diverse secondary polymeric materials, pressure, nozzle deformation magnirometricshy converter solenoid, a magnetometer, a thrust bearing reaction magnetoelastic transducer, force DC motor armature current.

References

1. C. Melting Rauwendaal, *Adv. Polym. Techn.*, No. 11, 19–25 (1992).
2. C. Rauwendaal, J. F. Ingen Housz, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, No. 9, 583–601 (1990).
3. G. A. Quick, V. Galperin, B. P. Titov, *Neutralization and utilization of waste plastics* (Leningrad 1982).
4. V. V. Dyadichev, B. N. Lokotosh, V. V. Levanichev, *Modeling coextrusion process* (Lugansk, 1998).
5. V. V. Dyadichev, *Waste plastics coextrusion* (Lugansk, 2003).
6. V. V. Dyadichev, *Extrusion of secondary polymers* (Lugansk, 2003).

7. D. F. Kagan, V. E. Gul, L. D. Samarin, *Combined multilayer film materials* (Moscow, 1989).
8. G. D. Kalynovska, *Path recycling laminates* (Leningrad, 1997).
9. P. Reitemeyer, *Kunststoffe* **78**, No. 5, 395–397 (1988).
10. F. R. Nissel, “Split barrier and modules feed block systems,” *Coextrusion V in SPE Regional Technical Conference* (Arlington, Oct. 1989).
11. J. Perdikonlias, J. Petric, *PM & E*, No. 9, 35–39 (1992).
12. A. Auffermann, *Coextrudierte Verbudfolien, Coextrudierte Folien und Pletten, Dussldorf*, (VDI, Verheg, 1990) pp. 11–32.
13. R. J. Nichols, F. Kheradi, *Modern Plastics* (1984).
14. K. Luker, *Paper presented at the Continuous Compounding Conference* (Beachwood, Ohio, 2000).
15. M. Shahinpoor, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, No. 12, 31–38 (1983).
16. F. J. Brinkschroeder, F. Johannaber, *Kunststoffe*, No. 71, 138–143 (1981).
17. C. Rauwendaal, *Adv. Polym. Techn.*, No. 11, 19–25 (1992).
18. B. Davis, *Polym. Eng. Sci.* **38**, No. 7, 1199 (1998).
19. C. J. Rauwendaal, U.S. Patent 5,909,958, “Screw Extruder with Adjustable Groove Depth,” 1999.
20. P. Elemans, J. M. Van Wunnik, “The Effect of Feeding Mode on the Dispersive Mixing Efficiency in Single-Screw Extrusion,” in *Proc. SPE ANTEC*, 2000, Pp. 265–267.
21. J. Fogarty, C. J. Rauwendaal, D. Fogarty, A. Rios, *SPE ANTEC Techn, Papers* (2001).
22. T. H. Kwon, J. W. Joo, S. J. Kim, *Polym. Eng. Sci.* **34**, No. 3, 174–189 (1994).
23. J. F. Ingen Housz, H. E. Meijer, *Polym. Eng. Sci.*, No. 21, 352–359 (1981).
24. J. Perdikonlias, W. Wybenga, “The development of a new coextrusion die for tubuler film,” in *TAPPI Pilymers, Laminations & Coatings Conference* (San Diego, Sept. 1991).
25. N. Miguchi, N. Saito, Y. Osada, *JSW Technical Review*, No. 14, 103–108 (1990).
26. J. Kies, *Coextrusion von Folier Reihe Kunststofftechnik* (VDI-Verlag, Dusseldorf, 1996).
27. C. D. Han, *Multiphase flow in polymer processing* (New York, Academic Press, 1981).
28. J. Dooley, L. Dietsche, *Plastics engineering*, No. 4, 37–39 (1995).
29. W. J. Schrenk, E. W. Veazely, *Enc. Polym. Sci. Eng.*, No. 7, 106–127 (1987).
30. R. Hegel, *Coex. Europe*, 385–389 (1986).

*Поступила в редакцию 20.03.2017 г. Принята к публикации 4.05.2017 г.
Received March 20, 2017. Accepted for publication May 04, 2017*