

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОЩЕЛЕВОЙ ЭКСТРУЗИОННОЙ ГОЛОВКИ ТИПА «РЫБИЙ ХВОСТ»

¹Шабарин А.А., ^{1,2}Кузьмин А.М.*

¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова

*kuzmin.a.m@yandex.ru

Экструзионные головки с плоскощелевым поперечным сечением на выходе используются для производства изделий с большим значением отношения ширины к толщине, такие как плоские пленки, листы, покрытия. В работе была использована программная система КОМПАС-3D для построения принципиальной схемы плоскощелевой головки. Для конструирования математической модели был использован программный комплекс ANSYS модуль Polyflow. Разработана математическая модель процесса экструзии термопластичных полимерных материалов через плоскощелевую экструзионную головку с коллекторами типа «рыбий хвост». Для оценки однородности распределения скорости расплава полимера по ширине формирующего канала головки введен коэффициент качества распределения, характеризующий разброс значений выходных скоростей расплава по ширине формирующего канала головки относительно среднего значения.

Ключевые слова: математическая модель, полимерный композит, экструзия, расплав, экструзионная головка, коэффициент консистенции.

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF A FLAT-SLOT EXTRUSION HEAD OF THE «FISHTAIL» TYPE

¹Shabarin A.A., ^{1,2} Kuzmin A.M.

¹Mordovia State University

²G.V. Plekhanov Russian University of Economics

Extrusion dies with flat slot exit cross-section are used for the production of products with a large width to thickness ratio, such as flat films, sheets, coatings. In the work, the KOMPAS-3D software system was used to construct a schematic diagram of a flat slot head. To construct a mathematical model, the ANSYS software package, the Polyflow module, was used. A mathematical model of the process of extrusion of thermoplastic polymeric materials through a flat-slot extrusion head with fishtail collectors has been developed. To assess the homogeneity of the distribution of the polymer melt velocity over the width of the forming channel of the head, a distribution quality factor was introduced that characterizes the spread of the values of output melt velocities along the width of the forming channel of the head relative to the average value

Keywords: mathematical model, polymer composite, extrusion, melt, extrusion head, consistency coefficient.

Введение

Экструзия является одним из самых распространенных методов получения полимерных материалов различного назначения. Исследование влияния различных параметров экструзионных головок, температуры [1], давления [2] является важной технологической и экономической задачей.

Экструзионные головки с плоскощелевым поперечным сечением на выходе используются для производства изделий с большим значением отношения ширины к толщине, такие как плоские пленки, листы, покрытия. Основной задачей проектирования системы каналов плоскощелевых экструзионных головок является получение равномерного распределения скоростей по всей ширине выходного сечения [3, 4]. При этом важной задачей является получение равнотолщинной пленки [5].

Экструзионные головки можно разделить на несколько групп по конфигурации систем каналов: головки с «Т-образным» коллектором, «V-образным» коллектором (типа «рыбий хвост») и с коллектором типа «вешалка». Головки с коллектором типа «вешалка» при правильно сконструированной системе каналов обеспечивают лучшее распределение расплава по ширине выходного отверстия. Основным их недостаток – высокие затраты на изготовление из-за сложной геометрической конфигурации.

Головки Т-образного типа имеют довольно простую конструкцию и обходятся дешевле в изготовлении. Головки типа «рыбий хвост» занимают промежуточное положение между двумя рассмотренными выше типами. Для равномерного распределения расплава в Т-образных головках и головках типа «рыбий хвост» используют дополнительные встроенные элементы [4, 6–9].

Целью настоящей работы является построение математической модели плоскощелевой экструзионной головки типа «рыбий хвост», исследование влияния реологических и конструктивных характеристик на распределение скоростей расплава экструдата на выходе из данной головки.

Расплавы термопластов относятся к классу неньютоновских жидкостей, эффективная вязкость η , которых является функцией скорости сдвига dy/dt [10–13]. Расчет течения таких жидкостей выполняется путем решения системы уравнений, описывающих наиболее общий случай движения жидкой среды. Системы уравнений, описывающие при математическом моделировании процессы течения неньютоновской жидкости, должны включать также реологические уравнения, характеризующие связь деформаций (скоростей деформаций) с напряжениями. В реологические уравнения в качестве необходимого элемента входят реологические параметры материала в виде материальных констант или функций.

Существуют два способа конструирования плоскощелевых экструзионных головок – аналитический и численный [4, 11, 14]. Численное проектирование имеет следующие преимущества:

- проектирование головок любой указанной геометрии, например, широкощелевых экструзионных головок с переменной высотой щели в формующей зоне;
- возможность указать любое распределение объемного расхода на выходе, что позволяет проектировать головки с заведомо неравномерным распределением объемного расхода;
- возможность дополнительно учесть потери давления на входе при перетекании расплава из распределительного канала в формующую щель;
- точное определение потерь давления при известной геометрии головки и заданной объемной скорости расплава на входе в головку [15].

Эксперимент

Одним из самых распространенных программных комплексов сегодня является программа ANSYS, использующая метод конечных элементов [16, 17]. После построения геометрической модели во встроенном в ANSYS модуле *Design Modeler*, экструзионная головка разбивается на сегменты (конечные элементы), для каждого из которых вычисляются значения объемного расхода и перепады давления.

В работе была использована программная система КОМПАС-3D для построения принципиальной схемы плоскощелевой головки. Для конструирования математической модели был использован программный комплекс ANSYS модуль Polyflow [18, 19]. При исследовании влияния реологических характеристик на распределение расплава в плоскощелевой головке использовали коэффициенты консистенции следующих материалов, полученных в работах [20–22]:

- полиэтилен марки ПЭНД 273-83 с коэффициентом консистенции $k = 25113 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$, индексом течения $n = 0,445$ (при температуре $160 \text{ }^\circ\text{C}$);
- композиция 1 (ПЭНД 273-83) (74 %) функционализированный методом щелочного алкоголиза севилен (СЭВА 12206-007 (Ф)) (10 %), полиэтиленгликоль (ПЭГ) (1%), пивная дробина (15 %) с коэффициентом консистенции $k = 36224$, индексом течения $n = 0,4441$ (при температуре $160 \text{ }^\circ\text{C}$);
- композиция 2 (ПЭНД 273-83 (37 %); ПЭВД 15303-003 (37 %); СЭВА (Ф) 12206-007 (10 %); ПЭГ (1 %); измельченный свекловичный жом (15 %) с коэффициентом консистенции $k = 31569 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$, индексом течения $n = 0,359$ (при температуре $160 \text{ }^\circ\text{C}$).

На рис. 1 представлена схема одной из наиболее распространенных в промышленности конструкций плоскощелевых головок с коллектором типа «рыбий хвост», построенная в программной системе КОМПАС-3D.

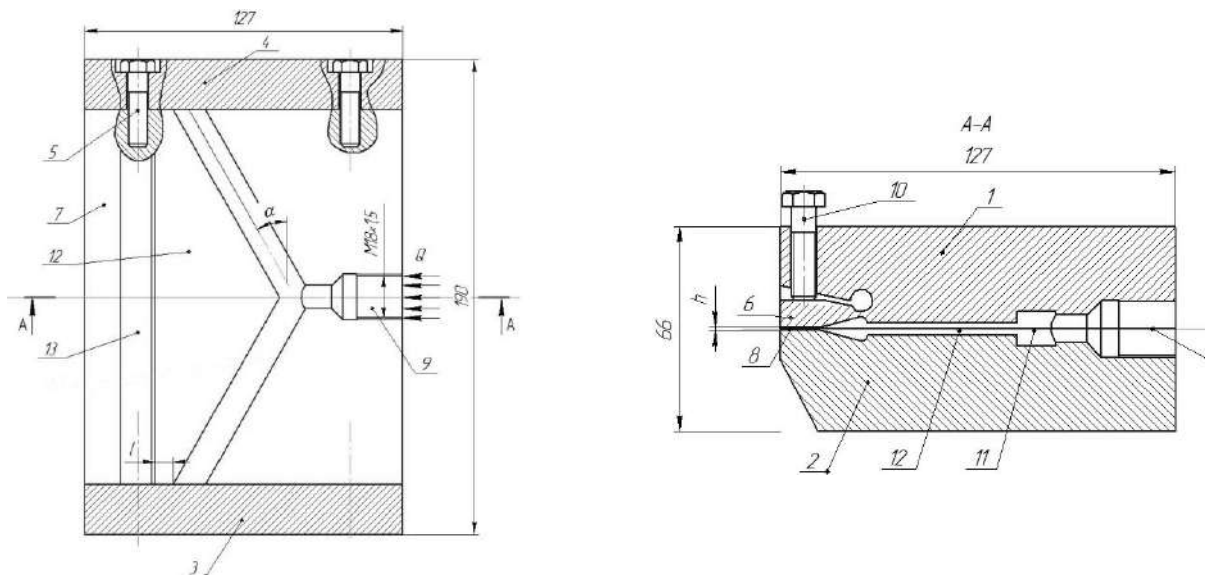


Рис. 1. Принципиальная схема плоскощелевой головки типа «рыбий хвост»:

1, 2 – верхняя и нижняя плиты; 3, 4 – боковые пластины; 5 – винты; 6, 7 – верхняя и нижняя формующие губки; 8 – плоскощелевой канал; 9 – входное отверстие; 10 – винт для регулировки высоты канала; 11 – коллектор; 12 – область вытеснения расплава; 13 – поперечный выравнивающий канал

Система дифференциальных уравнений, описывающих процесс течения расплава в плоскощелевой головке с коллектором типа «рыбий хвост» не имеет аналитического решения, поэтому анализ течения расплава в плоскощелевой головке был выполнен с помощью программного комплекса «ANSYS Polyflow».

При построении математической модели использовались следующие допущения:

- течение является полностью установившимся, ламинарным и изотермическим;
- расплав полимера является несжимаемым;

– на стенках системы каналов головки отсутствует проскальзывание, т. е. скорость течения на них равна нулю.

Так как плоскощелевая головка симметрична, для расчета с целью уменьшения временных затрат достаточно рассмотреть ее четвертую часть.

Для оценки равномерности распределения выходной скорости расплава полимера по ширине головки использовали стандартное отклонение, характеризующее разброс значений выходных скоростей расплава по ширине плоскощелевой головки относительно среднего значения скорости:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (w_i - \bar{w})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где $w_i = f(x_i)$ – скорость расплава в сечении x_i головки; n – количество сечений по ширине головки; \bar{w} – среднее значение скоростей по ширине выходного сечения рассчитанное по формуле

$$\bar{w} = \frac{\sum w_i}{n}. \quad (2)$$

Геометрические параметры экструзионной головки имели следующие начальные значения (рис. 1): угол канала коллектора $\alpha = 28^\circ$, высота щелевого зазора $h = 1$ мм, длина области вытеснения, прилегающая к боковым пластинам головки, $l = 7$ мм.

Объемная скорость расплава на входе в головку при моделировании составляла 130 мм^3 .

Результаты и их обсуждение

Исходя из гипотезы, что распределение скоростей по ширине головки подчиняется закону нормального распределения (закону Гаусса), качество распределения скоростей будем оценивать отношением ширины гауссовского распределения ($6S$) к средней скорости расплава \bar{w} (2)

$$k_w = 100 \frac{6S}{\bar{w}}, \%. \quad (3)$$

На рис. 2 представлены графики, характеризующие влияние объемной скорости потока расплава экструдата на значения коэффициента качества распределения скоростей на выходе из плоскощелевой головки (а) и требуемого давления (развиваемого экструдером) на входе в головку (б).

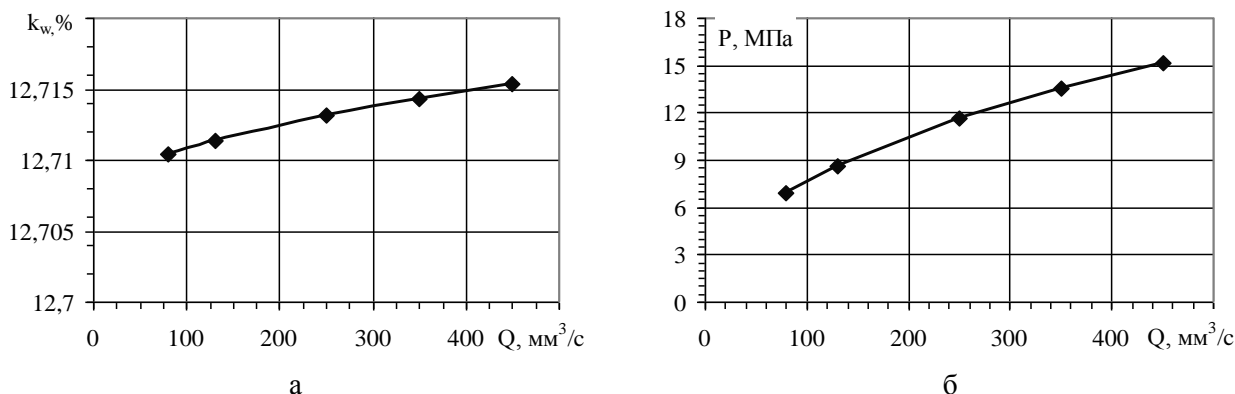


Рис. 2. Влияние объемной скорости расплава на коэффициент качества распределения скоростей экструдата на выходе из головки (а) и величину давления, создаваемого экструдером, на входе в головку (б)

Из графиков следует, что по мере увеличения объемной скорости экструдата наблюдается практически линейный рост давления с незначительным ($\sim 1\%$) изменением коэффициента качества распределения скоростей на выходе из экструзионной головки.

Данный результат дает основания предполагать получение равнотолщинной пленки при 5-кратном изменении производительности экструдера по расплаву без изменения конструктивных параметров головки.

На рис. 3 показано влияние вида композиционных материалов (ПЭНД 273-83, композиция 1, композиция 2) на давление и коэффициент качества распределения скоростей экструдата на выходе из головки.

Из рисунка видно, что для композиции 2, в котором в качестве наполнителя используется измельченный свекловичный жом, при прочих равных условиях давление на входе в головку заметно ниже, чем для ПЭНД 273-83 и композиции 1, наполненной пивной дробинкой. При этом изменение коэффициента качества распределения скоростей не превышает 4 %.

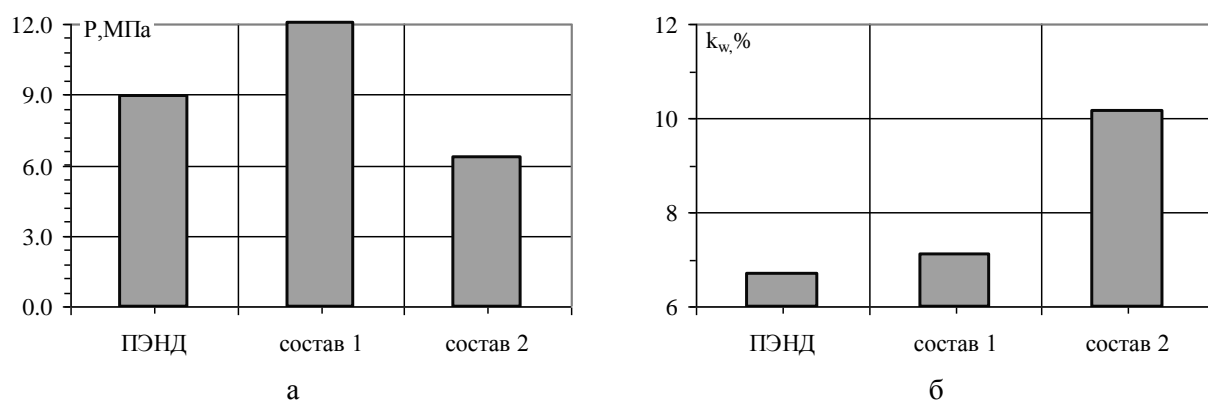


Рис. 3. Влияние вида композиционного материала на величину давления, создаваемого экструдером на входе в головку (а) и коэффициент качества распределения скоростей экструдата на выходе из головки (б)

В табл. 1 и 2 показано влияние значения коэффициента консистенции расплава и температуры головки на коэффициент качества распределения скоростей экструдата на выходе из головки.

Из данных следует, что при девятикратном изменении коэффициента консистенции расплава и росте температуры на $30\text{ }^\circ\text{C}$ изменение коэффициента качества распределения скоростей не превышает 1,2 %, что свидетельствует о возможности производства качественных пленок из различных полимеров без существенной перенастройки экструзионной головки.

Таблица 1

Влияние коэффициента консистенции k на коэффициент качества распределения скоростей k_w экструдата при $n = 0,359$

$k, \text{Па}\cdot\text{с}^n$	$k_w, \%$
10000	7,35
30000	6,34
50000	6,47
70000	6,41
90000	6,38

Таблица 2

Влияние изменения температурного режима T на коэффициент качества распределения скоростей k_w экструдата при $n = 0,359$

$T, ^\circ\text{C}$	$k_w, \%$
150	7,07
160	7,16
170	7,14
180	7,17

На рис. 4 представлены графики, отражающие влияние конструктивных параметров головки (длины l области вытеснения, прилегающей к боковым пластинам 7 и угла α коллектора 2, см. рис. 1) на величину коэффициента качества распределения скоростей экструдата.

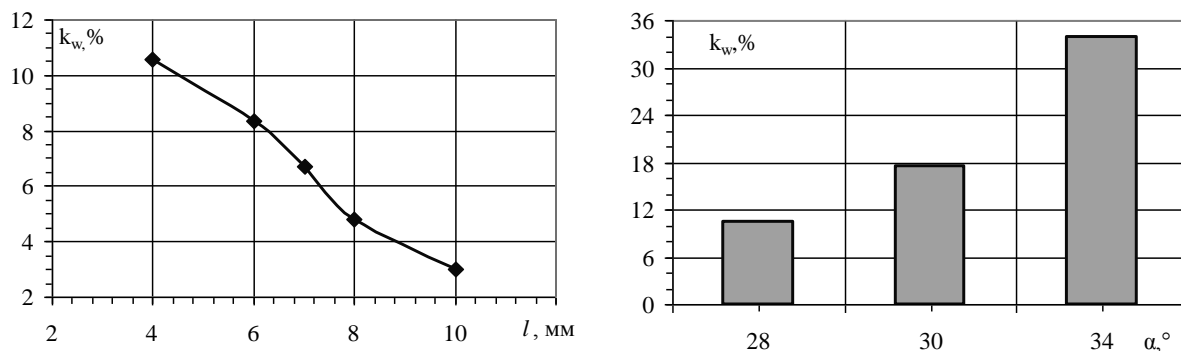


Рис. 4. Влияние длины области вытеснения l (а) и угла коллектора α (б) на коэффициент качества распределения скоростей экструдата

Из графиков следует, что изменение указанных параметров экструзионной головки оказывает наибольшее влияние на коэффициент качества. Для улучшения данного коэффициента при конструировании плоскощелевых головок целесообразно стремиться к уменьшению угла наклона α коллектора 2 и увеличению длины области вытеснения l .

Увеличение длины области вытеснения позволяет лучше распределить расплав по каналу плоскощелевой головки, однако, чрезмерный рост может привести к образованию застойных зон в канале и росту давления экструзии (табл. 3), что в целом негативно скажется на качестве полученной пленки.

Таблица 3

Влияние длины области вытеснения l после коллектора на давление P на входе в плоскощелевую головку

$l, \text{мм}$	$P, \text{МПа}$
4	8,57
6	8,52
7	8,96
8	9,1
10	9,09

Выводы

В результате численного моделирования установлено следующее:

- изменение длины области вытеснения головки l типа «рыбий хвост» в диапазоне 4-10 мм, угла α коллектора – 28-34° обуславливает изменение коэффициента качества распределения скоростей более чем на 30 %; оптимальные значения указанных параметров должны составлять: $l = 9$ мм, $\alpha = 28^\circ$;
- изменение скорости экструзии от 50 до 450 мм³/с, температуры расплава от 150 до 180 °С, коэффициента консистенции расплава от 10000 до 90000 Па·сⁿ, высоты формирующего плоскощелевого канала от 0,25 до 1 мм, вида композиционного материала (ПЭНД 273-83, составы 1 и 2 ухудшают коэффициент качества распределения скоростей расплава не более, чем на 2 %, что является свидетельством устойчивости работы разработанной экструзионной головки типа «рыбий хвост» и доказывает возможность получения равнотолщинной пленки без изменения конструктивных параметров головки и условий технологического процесса.

Библиография

1. Younes B., Fotheringham A. Factorial optimisation of the effects of extrusion temperature profile and polymer grade on as-spun aliphatic-aromatic co-polyester fibres III: mechanical properties // Journal of the textile institute. 2012. V. 103, N 2. P. 139–153.
2. Younes B., Fotheringham A., Mather R. Factorial Optimisation of the Effects of Melt Spinning Conditions on Biodegradable As-spun Aliphatic-Aromatic Co-Polyester Fibres // International polymer processing. 2011. V. 26, N 2. P. 150–163.
3. Басов Н.И., Брой В. Техника переработки пластмасс. М.: Химия, 1985. 528 с.
4. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины. СПб.: Профессия, 2007. 472 с.
5. Liu Y., Matuana L.M. Surface texture and barrier performance of poly(lactid acid)-cellulose nanocrystal extruden-cast films // Journal of applied polymer. 2019. V. 136. n. 9. P. 47594.
6. Соколов М.В., Кликов А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий: монография. М.: Машиностроение, 2007. 292 с.
7. Сафулин Д.М. Чистяков Д.Б. Течение расплавов полимеров в каналах сложной геометрии. Обзорная информация. М.: НИИТЭХИМ, 1984. 35 с.
8. Виноградова В.К., Симоненко Н.А. Формующие головки, применяемые в экструзионном оборудовании для производства полимерных изделий. Обзорная информация. М.: ЦИНТИ – Химнефте-маш, 1988. 45 с.
9. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов. М.: Химия, 1991. 352 с.
10. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.
11. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров / пер. с англ. под ред. Р.В. Торнера. М.: Химия, 1984. 632 с.
12. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости / пер. с англ. под ред. А.В. Лыкова. – М.: Мир, 1964. 216 с.
13. Крыжановский В.К., Николаев А.Ф., Бурлов В.В. Технология полимерных материалов: Синтез, модификация, стабилизация, рециклинг, экологические аспекты: учебное пособие. СПб: Профессия, 2011. 536 с.
14. Раувендааль К. Экструзия полимеров. СПб.: Профессия, 2006. 768 с.
15. Володин В.П. Программы компьютерного анализа для проектирования и оценки работоспособности экструзионных головок // Пластикс. 2006. № 3. С. 35–39.
16. Клебанов Я.М., Давыдов А.Н., Папировский В.Л. Использование программного комплекса ANSYS в учебном процессе (Самарский государственный технический университет) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: cadfem.ru.
17. Tang D.H., Marchesini F.H., D'hooge D.R., Cardon L. Isothermal flow of neat polypropylene through a slit die and its die swell: Bridging experiments and 3D numerical simulations // Journal of non-newtonian fluid mechanics. 2019. V. 226. P. 33–45.
18. ANSYS Polyflow: CFD for Extrusion, Forming & Molding [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-polyflow>

19. ANSYS Polyflow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cae-expert.ru/product/ansys-polyflow>.

20. Шабарин А.А., Шабарин А.А., Водяков В.Н., Кузьмин А.М. Биоразлагаемые композиционные материалы на основе полиолефинов и пивной дробины // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 17. С. 67–70.

21. Шабарин А.А., Шабарин А.А., Водяков В.Н. Получение биоразлагаемых композиционных материалов на основе полиэтилена и функционализированного методом алкоголиза сополимера этилена с винилацетатом // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26. № 2. С. 259–268.

22. Шабарин А.А., Шабарин А.А., Водяков В.Н., Кузьмин А.М. Получение биоразлагаемых упаковочных материалов на основе полиолефинов и свекловичного жома // Техника и оборудование для села. 2017. № 7. С. 14–19.