

Научная статья

Original article

УДК 62-5+62-4+62-1/-9

DOI 10.55186/02357801_2022_7_2_1



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАСПЛАВА
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

**THE MODELLING OF EXTRUSION MELT PROCESSES FOR POLYMER
COMPOSITES**

Стефанович Максим Андреевич, студент магистратуры кафедры «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (346400 Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), начальник производственного участка терморасширяющейся ленты уплотнительной на полимерной основе АО «Унихимтек», (142181, обл. Московская, г. Подольск, ул. Заводская (Климовск Мкр.), 2 корп. 121), +7(989) 712-55-13, e-mail: maxsteff@ya.ru

Губачев Владимир Анатольевич, к.э.н, доцент, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (346400 Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), +7(928) 604-27-38, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1964-5816>, e-mail: gva-ngma@mail.ru

Толстов Александр Михайлович, научный сотрудник лаборатории огнезащитных материалов АО «Унихимтек», (142181, обл. Московская, г.

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

Подольск, ул. Заводская (Климовск Мкр.), 2 корп. 121), +7(989) 712-55-13, e-mail: Tolstov.a@ograx.ru

Stefanovich Maxim Andreevich, Master's student, Department of «Automatic equipment and telemechanics», South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova (346400 Russia, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132, Novocherkassk), head of the production site of a thermally expanding polymer-based sealing tape at JSC «Unihimtek», (142181, Russia, Moscow region, Podolsk, Zavodskaya st. (Klimovsk Mkr.), 2 building 121), +7(989) 712-55-13, e-mail: maxsteff@ya.ru

Gubachev Vladimir Anatolyevich, PhD Econ., associate professor, associate professor «Automatic equipment and telemechanics» FGBOOU WAUGH "Southern Russian state polytechnical university (NPI) name of M.I. Platov", (346400 Russia, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132, Novocherkassk) +7(928) 604-27-38, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1964-5816>, e-mail: gva-ngma@mail.ru

Tolstov Alexander Mikhailovich, researcher of the laboratory of flame retardant materials of JSC «Unihimtek», (142181, Moscow region, Podolsk, Zavodskaya St. (Klimovsk Mkr.), 2 building 121), +7(989) 712-55-13, e-mail: Tolstov.a@ograx.ru

Аннотация

В статье рассматриваются современные методы моделирования экструзионных процессов в отраслях промышленности нацеленных на создание передовых решений. Хотя экструзия и используется с тридцатых годов XX века, промышленность требует все более развитых технологий и глубоких познаний в области применения пластмасс, пищевой и фармацевтической промышленности. Однако, до сих пор имеется только ограниченная информация об аналитических вычислениях в области экструзии. Как правило, производство выполняется на основе эмпирического опыта и методов проб и ошибок. Тем не менее современные технологии позволяют развивать промышленные операции на

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

порядок лучше и быстрее, благодаря моделированию соответствующих процессов, где экструзионный поток расплавов полимеров и волокон уже был подвергнут предварительным исследованиям.

Это исследование направлено на представление интегрированных глобальных моделей для математического моделирования процесса экструзии с использованием многофазных материалов, в которых необходимо учитываются коэффициент заполнения, поля давления, температурные поля и состояние плавления, а также скорость подачи в условиях затопления. Результаты этого исследования могут быть использованы для определения областей, требующих разработки, и для повышения производительности процесса экструзии.

S u m m a r y

The article discusses modern methods for modeling extrusion processes in industry, including the creation of advanced solutions. Although extrusion has been in use since the 1930s, the industry requires more and more extensive technology and application knowledge in the areas of plastics, carbohydrates and the pharmaceutical industry. However, there is so far only limited information on the identified needs in the field of extrusion. As a rule, production is based on empirical experience and trial-and-error methods. However, modern technologies allow the development of industrial operations an order better and faster, thanks to the appropriate modelling of processes, where the extrusion flow of polymer melts and outcomes has already been preliminary research.

This review is aimed at presenting integrated global models for mathematical modeling of the extrusion process using multiphase materials, in which the filling coefficient, pressure fields, temperature fields and melting condition, as well as the feed rate under flooding conditions. The results of this study can be used to determine areas requiring development, and to increase the performance of the extrusion process.

Ключевые слова: экструзия, моделирование, полимеры, композиты.

Keywords: extrusion, modelling, polymers, composites.

1. Введение

Экструдеры являются распространенными устройствами в пластмассовой, металлической и пищевой промышленности, а также обширно применяются в производстве продуктов, в которых используются полимеры. Типичные изделия, изготовленные из экструдированных полимеров, включают в себя, например, трубы, шланги, изолированные провода, кабели, листы и пленки, а также плитку [1].

Как правило, экструдеры классифицируются как одношнековые или двухшнековые, первый из которых обширно применяется для общей переработки полимеров и последнего для компаундирования различных волокон, наполнителей, и смеси полимеров перед окончательным формованием [2]. Двухшнековые экструдеры можно дополнительно подразделить на два типа в зависимости от взаимодействия двух шнеков: двухшнековые экструдеры с перемешиванием и без перемешивания.

Взаимозамешивающиеся двухшнековые экструдеры с обратным вращением были разработаны из тестомесильных машин непрерывного действия в 1939 году в составе модулей, предназначенных для компаундирования [3], и с тех пор было разработано множество различных экструдеров для повышения производительности производства в пищевой, металлургической, фармацевтической композитной отраслях [3,4]. В производстве на основе полимеров экструдеры первоначально использовались для профильной экструзии труб из поливинилхлорида. Модульные экструдеры, особенно экструдеры для близкого смешивания встречно-вращающаяся двухшнековая экструзия, подвергшаяся интенсивным экспериментальным исследованиям [5].

Моделирование – это эффективный способ изучения, анализа и совершенствования технологических процессов. Наряду с историческими разработками в области проектирования, производства и применения экструдеров, аналитически были исследованы условия эксплуатации и её параметры, а также представлены теоретические модели для описания данного технологического процесса. Теоретическое моделирование всё ещё остается

методом с некоторыми ограничениями, так как некоторые параметры все еще выбираются на итеративной основе непосредственно во время производства.

2. Общие замечания

Первые подробные анализы процесса экструзии были приведены классическим одношнековым приводом с потоковой подачей экструзии [6] и сосредоточении на процессе транспортировки расплава, а затем на транспортировке твердого тела. Ранняя фундаментальная модель расплава в одношнековом экструдере была предложена Мэддоком и Тадмором и др. [6-8]. Модели плавления и различные комплексные компьютерные модели легли в основу разработки одношнековых экструдеров с потоковой подачей, которые обсуждаются далее в статье. Однако, исследования по одношнековой экструзии с голодным питанием начались совсем недавно и в основном сосредоточены на способности смешивания и плавления, при этом моделированию процесса уделяется мало внимания [6,9].

С другой стороны, двухшнековые экструдеры широко используются в современной промышленности [5,10–13]. Такие экструдеры можно разделить на основе относительного направления вращения их шнеков на два типа: двухшнековые экструдеры с синхронным вращением и встречным вращением. В двухшнековом экструдере с синхронным движением максимальная скорость находится на концах шнека, тогда как в двухшнековых экструдерах со встречным вращением максимальная скорость достигается в области перемешивания. Исходя из этого, можно утверждать, что механизм синхронного вращения обеспечивает лучшее перемешивание по мере переноса материала между лепестками. Однако механизм обратного вращения значительно повышает давление, что делает его более эффективным для экструзии профилей [14]. Одношнековые и двухшнековые экструдеры были сравнены Сенанаяке и др. [15], в рамках проектного исследования, посвященного упрощенному экструдеру для менее развитых стран для приготовления экструзионных продуктов и обработки местных пищевых материалов. Одношнековые

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

экструдеры просты в конструкции, но с большей вероятностью забиваются материалом, чем двухшнековые экструдеры.

Двухшнековые станки используются для повышения производительности. При экструзии матрица является решающим фактором, влияющим как на производительность, так и на качество продукции. Самый простой способ увеличить производительность экструдера – увеличить скорость вращения шнека. Это простое решение обычно приводит к плохому качеству расплава, вызванному превышением плавильной способности конструкции шнека, и ухудшению качества, вызванному высокой температурой расплава [16]. Использование шнека меньшего диаметра может дать несколько преимуществ для достижения более высокой производительности при более высокой скорости вращения шнека. Одним из важных преимуществ экструдера меньшего диаметра являются лучшие характеристики теплопередачи.

Цель экструзионной матрицы состоит в том, чтобы распределить расплав полимера в проточном цилиндре таким образом, чтобы материал выходил из матрицы с равномерной скоростью и минимальным перепадом давления. За исключением цилиндров круглого сечения, чрезвычайно сложно создать единую геометрию проточного цилиндра, которую можно использовать для широкого спектра полимеров и условий эксплуатации. Через экструзионную матрицу распределение скорости на выходе зависит от скорости сдвига, температуры и тепловыделения расплава полимера [17]. Как при одношnekовой, так и при двухшnekовой экструзии геометрии цилиндров требуют равномерного нагрева без мертвых зон в цилиндрах потока для предотвращения горячих или холодных отрезков в потоке полимера, которые могут изменить вязкость расплава или привести к деструкции смолы [18]. Производительность и качество экструзии зависят от конструкции геометрии коллектора и условиях эксплуатации, принятых во время экструзии [17].

Процесс проектирования проточного канала может быть улучшен за счет интеграции вычислительного моделирования с эмпирическими данными и путем

совершенствования контрольно-измерительных приборов для экструзии. Улучшенная и разработанная конструкция шнека повышает качество продукции и сокращает время на разработку и оптимизацию процесса экструзии, что приводит к снижению затрат. [19] В двухшнековых экструдерах, поскольку вращение одного шнека входит в зацепление с цилиндром другого, происходит самоочистка, тем самым усиливается перемешивание материала в цилиндрах шнека, в одношнековых экструдерах материал удерживается гораздо дольше, чем в двухшнековых экструдерах, что связано с застойными слоями на поверхности шнека [20]. Двухшнековый экструдер имеет примерно втрое большую производительность, по сравнению с одношнековым аналогичного размера и скорости вращения шнека [21]. Теоретически процесс подачи материала можно разделить на четыре секции: подача экструдера; транспортировка массы; поток через матрицу и выход из матрицы и последующая обработка.

Во время обработки материала масса преобразуется в основном силой сдвига, давлением, скоростью охлаждения, формованием и временем пребывания [22]. Традиционно экструзионный цилиндр разделен на три части: зона подачи, переходная зона и зона дозирования.

Время обработки материала в экструдере называется временем пребывания. Время пребывания широко изучено распределение в перемешивающих двухшнековых экструдерах, вращающихся против часовой стрелки [20,23–26]. Исследование Сакаи и др. [20] сравнивающее распределение времени пребывания в двухшнековых экструдерах с обратным вращением и совместным вращением привело к открытию явления, где максимально четкое распределение времени пребывания было получено при использовании двухшнекового экструдера с обратным вращением.

Янссен и др. [23] изучали распределение времени пребывания путем введения импульсного индикатора, содержащего радиоактивный оксид магния, в полипропилен в двухшнековый экструдер Паскетти. Результаты разложения

магния (Mg) и железа (Fe) были обнаружены с помощью сцинтилляционного кристалла. Это и было использовано для определения распределения по возрасту выхода [21]. За этой работой последовала работа Вольфа и др. [25], в котором радиоактивный оксид магния был нанесён на машину «Krauss-Maffei» модели «KMD 90», которая использовалась для экструдирования поливинилхлорида. Шон и др. [26] сравнил распределение времени пребывания в четырех типах смесителей непрерывного действия и пришел к выводу, что двухшнековые экструдеры с промежуточным вращением против вращения имели более узкое распределение времени пребывания, чем модульные двухшнековые экструдеры и соэкструдеры [21].

Большинство коммерческих экструдеров предоставляют на выбор шнеки или сменные секции, которые изменяют конфигурацию зон подачи, перехода и дозирования. Шнеки с голодной подачей в основном используются в двухшнековых экструдерах. Производительность экструдера не зависит от скорости вращения шнека в установившемся режиме. В отличие от плавления в одношнековых экструдерах, исследования плавления в двухшнековых экструдерах появились в литературе только недавно [12]. Благодаря исследованиям были разработаны различные модели для анализа процесса плавления в двухшнековых экструдерах. На основе же этих моделей плавления были разработаны несколько комплексных компьютерных моделей, в основном для двухшнековых экструдеров с одновременным вращением [9].

3. Моделирование процессов

Для того, чтобы смоделировать процесс, важно выбрать правильный инструмент моделирования для практического и реального анализа технологического процесса. Для экструзии полимерных композитов инструмент моделирования должен быть оснащен для обработки аспектов, важных для процесса. Например, условия экструзии могут не являться изотермическими и изобарическими [27], так-как в большинстве случаев материал неоднороден. Это

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

отсутствие однородности еще более усложняется, если процесс включает гранулы [28] или волокна [29,30]. В 1990-е годы, неизотермические потоки были изучены Каем и др. [31] и Уайт, и Чен [32,33] в совместно вращающемся двухшнековым экструдере, от «Bang & White» [34] в двухшнековых машинах с тангенциальным встречным вращением и «Hong and White» [35] для перемешивания двухшнекового экструдера с обратным вращением.

Поток полимеров в экструзии должен быть четко определен, хоть по-прежнему смоделировать поток в двухшнековых экструдерах является сложной задачей. Более продвинутое моделирование требует комплексного подхода, который включает тщательное изучение перемещения твердого вещества, плавления и потока расплава полимера. Первые подробные анализы процесса экструзии полимеров были связаны с транспортировкой расплава, а затем с транспортировкой твердого тела. На основе этих моделей были разработаны различные комплексные компьютерные модели процессов экструзии. Поскольку большинство двухшнековых экструдеров самоочищаются и имеют голодное питание [36], в новых исследованиях появляется все больше моделей для таких экструдеров [9,37]. Поток расплавленного полимера может быть представлен в глобальной модели с использованием одномерных и двумерных подходов [6,8,37,38]. Эта работа включает в себя упрощение моделей траектории частиц и их анализа, что требует знания геометрии шнека, свойств материала и условий обработки. Примерами экструзионного моделирования для таких анализов является «LUDOVIC», «Mogex», «SIGMA», и «Akron-Co-Twin Screw» [39–41]. Основными параметрами процесса являются давление, температура, время пребывания и коэффициент заполнения.

«LUDOVIC», это программное обеспечение для моделирования макротермомеханического поведения в двухшнековых экструзионных и пакетных процессах. Подход одномерного моделирования является неизотермическим по длине шнека и позволяет пользователю рассчитать эволюцию основных параметров процесса.

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

При моделировании сверхскоростной экструзии [42], например, при помощи программного обеспечения «LUDOVIC», для расчета термомеханических параметров потока для различных профилей шнеков, было установлено, что оно обеспечивает хорошую корреляцию между теоретическими и экспериментальными результатами. Вильчинки и др. [9] использовали систему моделирования «TWIN_CT» (т. е. встречно вращающуюся двухшнековую экструзионную модель) для различных конфигураций шнеков. В этой модели представлены три основные области процесса: транспортировка твердого тела, плавление и поток расплава. Моделирование позволяет прогнозировать ход плавления полимера, экструзию под давлением и температурные профили, а также степень заполнения шнекового цилиндра в двухшнековом экструдере с встречным вращением [41]. Эта модель очень эффективна для модульной шнековой компоновки. Методика, основанная на трёхмерном моделировании «FEM», была представлена Исикавой и др. [43] в качестве численной модели для совместно вращающегося двухшнекового экструдера. Эта модель претендует на роль мощного инструмента для оценки производительности смешивания, поскольку она позволяет оценивать параметры смешивания, такие как «RTD» и историю напряжений и деформаций.

Модель плавления Вильчинки и Уайта [37] описывает влияние давления в зазоре двухвалкового каландра на плавление полимеров. Полимер плавится и вытекает из зазора для каландрирования, находящегося под давлением конца «С»-камеры, в потоке под давлением. Эта модель обеспечивает теоретическое обоснование использования шнеков с обратным вращением. Вильчинки и др. [9] обобщил подход для моделирования пластических процессов для одношнекового оборудования, и Баронский-Пробст и др. [10] сделал то же самое для двухшнековой экструзии.

В большинстве случаев подходы схожи с небольшими вариациями, когда в процессе происходят изменения условия, как показано Редлом и др. [39] для самоочищающихся и голодающих экструдеров. Коэффициент заполнения был

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

неизвестен для системы, поэтому расчет производился в обратном направлении от матрицы к подаче. Из-за неизвестной температуры конечного продукта была использована итерационная модель для расчета профилей давления, коэффициента заполнения и температуры. Рассчитанная температура в положении, где температура плавления сравнивается с температурой плавления используемого пластика. При использовании двух итерационных вычислений получаются хорошие модели, где температуры будут равны [5,9]. При численном анализе потока полимеров во вращающихся шнеках считается, что материал находится в жидкой форме из зоны подачи [36]. С другой стороны, когда плавление наблюдается экспериментально, на него влияют такие факторы, как скорость подачи, скорость вращения шнека и скорость сдвига, что указывает на то, что плавление является постепенным процессом. Эксперименты, проведенные Левандовски и др. [5] показывают, что плавление начинается раньше, когда скорость подачи увеличивается из-за более быстрого образования слоя потока расплава. Когда «С»-камеры заполняются более полно, а длина потока расплава (слой, образованный полу-или полностью расплавленным полимером в цилиндре) больше, для полного расплавления полимера требуются более длинные шнеки. Когда скорость шнека при постоянном расходе увеличивается, плавление занимает больше времени, так как полимерные потоки транспортируются быстрее, а степень заполнения уменьшается [44]. Однако, поскольку «С»-камера менее заполнена, для полного расплавления необходимы более короткие шнеки. Модель Вильчинки и др. [45] различает две области плавления: частично заполненную область плавления и полностью заполненную область плавления. Основываясь на явлениях плавления, были предложены математические модели для плавления в обоих регионах [5,6]. В частично заполненной области энергетический баланс был применен к элементарному объему материала, находящегося под предположением о том, что в этой области не выделяется тепло трения.

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

Около 80% тепла, необходимого для плавления, поступает за счет тепла, возникающего в результате трения между шнеками и цилиндром, что приводит к сдвиговым напряжениям в материале. Оставшееся тепло подается от внешних источников, таких как комплекты нагревателей тепловых картриджей, расположенных в пазах в корпусе [14,46,47]. Большинство моделей процесса экструзии упрощают моделирование, пренебрегая некоторыми параметрами. Процесс экструзии был оптимизирован Маликом и др. [48] за счет включения настенного скольжения условия на поверхностях ствола и шнека.

В зонах смешения, состоящих из комбинаций шнековых элементов прямой и обратной транспортировки, скольжение стенки уменьшает скорость увеличения давления шнековых элементов прямой транспортировки и скорость потери давления шнековых элементов обратной транспортировки, что приводит к общему снижению давления в смесительной секции. Это говорит о том, что процесс может быть оптимизированным путем контроля поведения жидкости при скольжении по стенкам с помощью разумного выбора материалов, шероховатости поверхности и температур для поверхностей шнека и цилиндра экструдера и матрицы.

Совсем недавно Polyflow, программное обеспечение CFD с конечными компонентами, разработанное ANSYS, использовалось для моделирования процессы экструзии как одношнековых, так и двухшнековых экструдеров [5]. Благодаря ему были предсказаны температурное поле, изменение давления вдоль шнека, схема течения, время пребывания и силы сдвига. Левандовский и др. [5] и Левандовски [12] применил подход, использующий полностью трехмерное неньютоновское моделирование FEM, для описания характеристик шнековой накачки в двухшнековом экструдере с полимерами, вращающимся против часовой стрелки. Результаты были подтверждены экспериментально. Поведение неньютоновского истончения при сдвиге расплавленных полимеров обычно моделируется моделью степенного закона или логарифмическим уравнением Клиена. Однако профили давления для

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

ньютоновской и неньютоновской жидкости, как правило, одинаковы, и градиент давления уменьшается с уменьшением индекса степенного закона [5,12]. Примером моделирования жидкости является исследование Тальявини и др. [49] использовался ли «ANSYS FLUENT» для моделирования вычислительной гидродинамической модели зоны подачи двухшнекового экструдера. Контур вязкости шнековой секции в зоне подачи, один из результатов моделирования в обеих областях [5,6]. В частично заполненные области энергетического баланса были применены к элементарному объёму материала в предположении, что в этой области не выделяется тепло трения. Около 80% тепла, необходимого для плавления или плавления массы, поступает за счет тепла, возникающего в результате трения между шнеками и цилиндром, что приводит к сдвиговым напряжениям в материале. Оставшееся тепло подается от внешних источников, таких как комплекты нагревателей тепловых картриджей, расположенных в пазах в корпусе [14,46,47].

Большинство моделей процесса экструзии упрощают моделирование, пренебрегая некоторыми параметрами. Процесс экструзии был оптимизирован Маликом и др. [48] за счет включения условий скольжения стенок на поверхностях цилиндра и шнека. В зонах смешивания, состоящих из комбинаций шнековых элементов прямого и обратного хода, скольжение стенки уменьшает скорость увеличения давления шнековых элементов прямого хода и скорость потери давления шнековых элементов обратного хода, что приводит к общему снижению давления в секции смешивания. Это говорит о том, что процесс можно оптимизировать, контролируя поведение жидкости при скольжении по стенкам с помощью разумного выбора материалов, шероховатости поверхности и температур для поверхностей шнека и цилиндра экструдера и матрицы.

Совсем недавно Polyflow, программное обеспечение CFD с конечными элементами, разработанное ANSYS, использовалось для моделирования процессов экструзии как одношнековых, так и двухшнековых экструдеров [5].

Были предсказаны температурное поле, изменение давления вдоль шнека, схема течения, время пребывания и силы сдвига. Левандовски и др. [5] и Левандовски [12] применили подход, использующий полностью трехмерное неньютоновское моделирование FEM, для описания характеристик шнековой накачки в двухшнековом экструдере с полимерами, вращающимся против часовой стрелки. Результаты были подтверждены экспериментально. Поведение неньютоновского истончения при сдвиге расплавленных полимеров обычно моделируется моделью степенного закона или логарифмическим уравнением Клиена. Однако профили давления для ньютоновской и не ньютоновской жидкости в целом аналогичны, и градиент давления уменьшается с уменьшением индекса степенного закона [5,12]. Примером моделирования жидкости является исследование Тальявини и др. [49], в котором «ANSYS FLUENT» использовался для моделирования вычислительной гидродинамической модели зоны подачи двухшнекового экструдера.

Моделирование процессов развилось из первых математических и физических моделей, созданных авторами: Пирсона и Петри [50,51] к использованию современной платформы моделирования. Например, Влахопулуси Сидиропулос [52] использовал программное обеспечение «SPIRALCAD ADVANCE» для моделирования конструкции спиральной матрицы для экструзии выдувной пленки [2]. Моделирование процессов эволюционировало от первых математических и физических моделей, созданных Пирсоном и Петри [50,51], до использования современной платформы моделирования. Например, Влахопулуси Сидиропулос [52] использовали программное обеспечение «SPIRALCAD ADVANCE» для моделирования конструкции спиральной матрицы для экструзии выдувной пленки.

4. Процесс расплава в цилиндре

Подающая горловина экструдера вводит материал в шнековый цилиндр. Горловина обычно обхватывает первые несколько пролетов шнеков экструдера.

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

Чтобы предотвратить раннее повышение температуры в зоне горловины подачи, корпус, как правило, охлаждается водой. При чрезвычайно высоких температурах полимер может прилипнуть к поверхности загрузочного отверстия, вызывая ограничение потока в экструдере приводя к проблемам с транспортировкой твердых веществ [24]. Чтобы обеспечить постоянный поток через бункер, следует учитывать постепенное сжатие в сходящейся области, а поперечное сечение бункера должно быть круглым.

Современные экструдеры имеют модульную конструкцию шнека для обеспечения эффективного перемешивания в цилиндре. Вильчинки и др. [9] представили современную методику комплексного моделирования шнековой обработки пластмасс. Многоцелевая компьютерная система изучала транспортировку, плавление и смешивание материала, а также создание давления для проталкивания материалов через матрицу экструдера. Процедуры оптимизации модели, основанные на генетических алгоритмах, имитирующих естественный эволюционный процесс, и поверхность отклика были заданы математическими моделями процесса. В исследовании подчеркивалась важность прогнозирования поведения материала, такого как свойства плавления и термомеханическая история, во время шнековой обработки.

На полимерный материал в цилиндре влияют температура и скорость вращения шнека, а также время. При экструзии термин "распределение времени пребывания" (РВП) используется для описания распределения времени пребывания полимерного материала внутри цилиндра и матрицы. [53]. Распределение времени пребывания РВП и давление вокруг штампа оказывают прямое влияние на профиль изделия. РВП имеет важное значение, так как этот полимерный материал остается внутри ствола и матрицы. [53]. Распределение времени пребывания РВП и давление вокруг штампа оказывают прямое влияние на профиль изделия. РВП имеет важное влияние на характеристики продукта, поскольку оно определяет время воздействия на материал температуры, давления, геометрии смешивания и сдвига. Влияние РВП можно проследить с

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

помощью ближней инфракрасной области спектроскопия и использование УФ-поглотителя. На РВП влияет среднее время пребывания (СВП), которое, в свою очередь, зависит от конфигурации шнека.

Для двухшнекового экструдера Гаутам и Чоудхури [54] заметил, что тип, длина и положение смесительных элементов, а также расстояние между двумя элементами значительно влияют на СВП. Время пребывания массы в экструдере значительно увеличивается при включении смесительных элементов в профиль шнека. Время пребывания было удвоено за счет включения обратных шнековых элементов. Также было обнаружено, что если положение смесительных элементов отодвигалось от матрицы, то СВП увеличивалось. Кроме того, увеличенное расстояние между смесительными элементами увеличивало СВП с увеличением длины элементов. Другие более ранние исследования [55–59] показали, что СВП уменьшается за счет увеличения скорости подачи и скорости вращения шнека из-за учета уменьшения содержания влаги в корме. Смесительные элементы обычно используются в экструдерах. Месильный блок и его отдельные диски составляют доминирующий дисперсионный смесительный блок жидкостной системы. В отличие от транспортирующего элемента, смесительный элемент обычно работает при полном заполнении материалом и может частично или полностью зависеть от потока, управляемого давлением [28]. На доступный объем материального потока влияет только толщина диска. Томпсон и др. [28] использовали смесительные элементы для объяснения влияния конфигурации шнека на влажную грануляцию. В дополнение к месильным дискам они использовали гребенчатые смесительные элементы, позволяющие разделять и рекомбинировать потоки потока с различной историей сдвига.

Использование гребенчатых смесителей для перераспределения расплава в цилиндре создало более надежную область смешивания в этом эксперименте. Движение модульных роторов вызывало колебания давления, как наблюдали Браво и др. [60]. Системы с траверсами способны наносить резиновые смеси на

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

подложку, которая может быть сплошным материалом, таким как проволока или кабель, или прерывистым материалом, таким как роликовый центр или оправка [61]. Структура матрицы была проанализирована и оптимизирована с использованием методов конечных элементов. Такие исследования имеют как правило, основное внимание уделяется штампам для экструзии металла из-за высокого давления и температуры [62,63]. Пропускная способность линейно увеличивается с увеличением скорости вращения шнека. Удельная производительность, по-видимому, не зависит от давления в широком диапазоне температур расплава и скоростей вращения шнека.

Появление новых сложных применений в индустрии пластмасс привело к появлению профилей штампов все большая сложность используется для производства, что, естественно, способствует несбалансированному потоку [61]. Быстро растущей областью исследований являются многослойные пленки, которые все чаще используются в упаковке для достижения конкретных требований к производительности. Новые полимеры и технологии обработки способствовали развитию многослойных пленок [64]. Соэкструзия является распространенным методом, используемым для получения многослойных выдувных пленок. В целом, для устранения неравномерного потока материала через матрицу может быть принято несколько мер, таких как изменение формы матрицы, расположение иллюминатора, размер иллюминатора и локальная длина подшипника. На практике равномерный поток является обязательным условием хорошего качества продукции, особенно при экструзии профилей. При моделировании равномерного потока проектировщики процессов и штампов, операторы процессов и корректоры штампов перешли от методов проб и ошибок [63] использовать современные такие методы, как моделирование вычислительной гидродинамики [49]. В случае соэкструзии требуется, чтобы скорость и напряжения были непрерывными на границе раздела между смежными слоями многослойного потока полимеров [64]. Влияние вязкости полимера на форму поверхности раздела, скорость, давление, скорость сдвига и

распределение времени пребывания. Используя программное обеспечение [65] обнаружили, что вязкость двух полимеров оказывает значительное влияние на форму формирования границы раздела фаз, скорость, давление и скорость сдвига в матрице, но лишь незначительно влияют на распределение времени пребывания эти два полимера.

5. Подкрепления при обработке

Увеличение стоимости чистых полимерных материалов привело к необходимости в менее дорогих армирующих или наполнительных материалах, которые не оказывают негативного влияния на прочность и износостойкость получаемого полимерного профиля. Одним из таких наполнителей является древесина в виде как муки, так и волокон. Кроме того, увеличение стоимости древесины и деревянных каркасов в строительных изделиях означает, что существует спрос на альтернативные твердые изделия. Соответственно, использование пластиковых экструзионных профилей в качестве замены изделий из дерева в дверных и настенных приложениях, а также в оконных рамах и литье, возросла в последние годы. Использование более дешевого полимера в качестве наполнителя, например, при производстве полимерных пленок, является значительным способом снижения затрат на сырье. Кроме того, интерес к использованию переработанных полимеров также заметно возрос из-за ужесточения законодательства. Замена первичных полимеров на переработанные, дает возможность снизить затраты на сырье тех областях применения, где допускается использование переработанных полимеров. Целлюлоза или волокна на основе целлюлозы требуют связующих агентов для улучшения их адгезии с матрицами. Привитые малеиновым ангидридом полиолефины, изоцианаты и силаны являются широко

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

используемыми связующими агентами, которые улучшают не только адгезию, но и механические свойства композита [66]. Полимерные композиты, армированные деревом или другими материалами из натуральных волокон, продемонстрировали замечательные улучшения физических свойств полимерных материалов.

Эксперименты были проведены с использованием новых натуральных волокон, таких как шлифовальная пыль для шелухи подсолнечника (SHSD), которая использовалась в качестве композита с полипропиленом [29]. Хотя получение оптимальных условий обработки для экструзии было итеративным, можно сделать некоторые наблюдения о поведении волокон в шнеках экструдера. Добавление SHSD повлияло на кристаллизационное поведение композита. Кроме того, температура кристаллизации полипропилена увеличилась, в то время как температура плавления оставалась постоянной. Кристаллизация полимеров влияет, например, на термические, механические и химические свойства полимера. Кристаллизация или кристаллизация, вызванная потоком, как свойства полимера не обсуждаются в этой обзорной статье. Поглощение влаги древесиной является одной из трудностей, связанных с добавлением древесной муки. Потеря влаги в экструдате может замедлить скорость экструзии в результате увеличения вязкости [4]. Более того, в отличие от чистых полимеров, добавление тепла к древесной муке не улучшает текучесть экструдата. Инкапсулирование древесных волокон смолой и их укладка на потоки расплава может быть использовано для улучшения обрабатываемости во время экструзии, когда эти заготовки, когда эти компоненты можно смешивать в расплаве это как вариант мысли можно смешивать.

Поглощение влаги древесиной мукой одна из основных сложностей, связанных с добавлением древесной муки. Потеря влаги в экструдате может замедлить скорость экструзии в результате увеличения вязкости [4]. Более того, в отличие от чистых полимеров, добавление тепла к древесной муке не улучшает

текучесть экструдата. Инкапсулирование древесных волокон смолой и их укладка на потоки расплава может быть использовано для улучшения обрабатываемости во время экструзии, когда эти заготовки на потоки расплава, можно смешивать с дополнительной смолой и другими технологическими агентами. Включение надлежащего количества армированных волокон (5-20 об.%) в термопластичную смолу значительно улучшает стабильность размеров, прочность на растяжение, модуль упругости, электрические свойства и коррозионную стойкость [30]. Эти свойства связаны с концентрацией волокон, длиной, диаметром и распределением. Для повышения прочности композита средняя длина волокна в матрице должна максимально превышать минимальную длину волокна в полимерной матрице, не нарушая технологичность [30]. Условия экструзии напрямую связаны с механическими свойствами продукта. Хотя была проведена работа по экспериментированию с подбором параметров, разумно смоделировать процесс для экономически эффективных экспериментов с возможностью изменения параметров, что приводит к оптимизации экструзии.

6. Эффекты волокон в экструзии

За последние десятилетия многие авторы (например, [67–70]) исследовали влияние повреждения волокон на свойства композитов при компаундировании и экструзии. Различные технологические факторы, такие как геометрия шнека и скорость, размеры волокон, скорость подачи, температура цилиндра и вязкость полимера влияют на разрыв волокон в шнеках. Некоторые исследования [71–73] попытались смоделировать повреждения волокон в шнеках, но моделирование также оказалось сложной задачей. Например, Берзин и др. [73] отметил, что важно объединить программное обеспечение для моделирования и законы развития области применения для размеров волокон. Сокращение длины волокна наиболее сильно проявляется на первом этапе обработки, когда пучки волокон подвергаются. Альбрехт и др. [72] отметил, что разделение пучка волокон должно быть реализовано в моделировании, чтобы повысить надежность модели.

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

В процессе экструзии композита существует ограничение на длину волокна. Для повышения прочности композита средняя длина волокна в матрице должна превышать критическую длину на столько, на сколько возможно [30]. Поэтому важно оценить влияние переменных обработки на степень дегазации волокна во время экструзии. Уменьшение длины и распределения волокон оказывает негативное структурное воздействие на композитное изделие. Концентрация напряжения сдвига возникает вблизи концов волокна, именно здесь начинается неудача. Большой разрыв волокна приводит к большему количеству концов волокна, которые действуют как места для концентрации напряжений, при которой возникают зарождение и распространение межфазных трещин, что приводит к разрушению при растяжении [30,74].

Несколько исследований [30,46,75] провели эксперименты и выбрали параметры на основе существующих исследований и итерационных методов. Экспериментировать с новыми материалами и комбинациями материалов сложно, поскольку существуют ограничения на условия работы экструдера, особенно при работе с волокнами, что делает численный анализ очень сложным. Давление в двухшнековом экструдере, может быть, управляется обратной транспортировкой (т. е. сбросом давления) и прямой транспортировкой (т.е. повышением давления) в шнековых секциях. Модель Вильчинки и др. [9] ясно показывает, что давление создается только в полностью заполненных областях шнеков, то есть на концах шнеков, близких к штампу, в области режущих элементов. Как правило, производительность откачки шнеков уменьшается, если перекачиваемая жидкость не ньютоновская, и увеличивается по мере того, как жидкость становится более ньютоновской [9].

Вильчинки и др. [76] смоделировали эффекты скольжения при одношнековой экструзии древесно-полимерных композитов. Моделирование потока шнека, показал, что профиль скорости резко изменился, а давление существенно упало в барабане экструдера и матрице. Скольжение на шнеке и на матрице оказывает важное влияние на скорость потока и давление экструзии.

Они обнаружили, что повышенное скольжение на шнеке снижает как расход, так и давление, в то время как повышенное скольжение на штампе увеличивает расход и снижает давление. Деграция волокна при низкой деформации сдвига незначительна (как показано в исследовании Хаузнерова и др. [30]) на основе сравнения распределения волокон по длине до и после экструзии. Как упоминалось ранее, экструзия с волокнами эффективна при использовании многократной экструзии и укладке слоев полимера с волокнами. Кажущаяся вязкость при постоянной скорости сдвига в зависимости от количества выдавливаний уменьшается постепенно по мере экструзии повторяются из-за деструкции матричного полимера и уменьшения длины волокна. Увеличение числа циклов экструзии уменьшает длину волокон. Во время первой экструзии уже наблюдалось серьезное повреждение волокон независимо от используемой скорости экструзии.

В этой статье была рассмотрена обширная работа по экструзии, сделанная за последние десятилетия. Хотя процесс экструзии хорошо известен и широко используется в обрабатывающей промышленности, достижения в области материалов приводят к новым требованиям. Многие авторы исследовали механизмы плавления, смешивания и дозирования полимеров. Однако существует незначительная литература по тем же функциям, что и для многофазных материалов. Для механической экструзии изделий конечной целью является оптимизация структурных свойств, а ключом к определению оптимальных параметров процесса является итерация. Поиск взаимосвязей между свойствами продукта и параметрами процесса является сложным, дорогостоящим и ограниченным, если используются только экспериментальные данные. Таким образом, успешное моделирование и имитационное моделирование могут обеспечить быструю и экономичную разработку.

Исследования разрушения волокон из-за сил сдвиговых напряжений в материале, действующих через расплавленную матрицу, представляют особый

Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral"

интерес, поскольку разрушение волокон напрямую связано со структурными свойствами конечного продукта. Также, существует необходимость дальнейшего изучения факторов, вызывающих эту проблему, для обеспечения оптимизации процесса, а также необходимость изучения и развития параметров процесса, таких как давление, расход и температура, для облегчения эффективного управления процессом. Инструменты моделирования или модели анализа конечных элементов, как обсуждается в статье, исторически во многих случаях концентрировались только на экструзии чистого полимера. Информация о материалах, содержащих частицы, ограничена. Требуется инструмент моделирования для обеспечения возможности модификации характеристик шнеков, анализа эффектов добавления шнековых элементов, определения волокнистых материалов и точного извлечения профилей параметров. Многократная экструзия является обычной практикой, используемой для улучшения смешивания волокон и полимеров. Можно спроектировать экструзионную шнековую конструкцию, чтобы избежать многократной экструзии и уменьшить деградацию волокна. Хотя более низкое напряжение сдвига приводит к низкой деструкции волокон, которой в литературе пренебрегают [30], кажущаяся вязкость при постоянной скорости сдвига уменьшается с увеличением числа экструзий из-за деструкции полимера. Остается открытым вопрос, можно ли добиться необходимой деструкции с помощью инструментов моделирования и можно ли эффективно наблюдать изменения свойств конечного продукта.

Экструзия – это энергоемкий процесс. Термическая стабильность и энергоэффективность сильно зависят от условий процесса; полимерный материал и используемый экструдер, а также система управления и мониторинга технологического процесса [77].

Проектирование и моделирование технологических процессов играет ключевую роль в повышении энергоэффективности процесса экструзии. Шнековые узлы и матрицы экструдера являются двумя основными областями

проектирования, которые оказывают значительное влияние на разложение частиц и смешивание материалов. Модифицируемая конструкция может быть создана для анализа эффективности шнека, и конструкция может быть оптимизирована с помощью вычислений, прежде чем приступить к производству в экструдере.

Для создания хорошего материала необходима оптимизированная длина волокон. В некоторых случаях минимально-оптимальная длина уже определена (например, [30]), и эти данные могут быть использованы в качестве справочных для моделирования процесса экструзии с волокнами. В основной области разрушения возникают три возможных механизма разрушения: разрыв волокна, ствол волокна и разрыв волокна-полимера [9].

Как отмечается в этой статье, на рынке уже существует несколько инструментов для моделирования экструзии. Большая часть программного обеспечения была разработана для экструзии полимеров (жидкостей). Хотя многофазная экструзия является возможным в некоторых случаях подход сталкивается с ограничениями при использовании волокнистых композитов. Разработка использование универсального инструмента для моделирования экструзии способствовало бы более эффективному и широкому использованию экструзии в современном производстве.

Список использованных источников

1. Chokshi, R.; Zia, H. Hot-Melt Extrusion Technique: A Review. Iran. J. Pharm. Res. 2004, 3.
2. Sakai, T. Screw extrusion technology—Past, present and future. Polimery/Polymers 2013,58.
3. Leistritz, P.; Burghauser, F. German Patent 699 757 1940. Ger. Pat. 1939, 682, 787.
4. Cope, C.W. Polymer and Wood Flour Composite Extrusion. U.S. Patent 5,847,016, 8 December1998.

5. Lewandowski, A.; Wilczyński, K.; Wilczyński, K.J.; Nastaj, A. A composite model for an intermeshing counter-rotating twin-screw extruder and its experimental verification. *Polym. Eng. Sci.* 2015, 55, 2838–2848. [Перекрёстная ссылка]
6. Wilczyński, K.; Nastaj, A.; Wilczyński, K.J. Melting model for starve fed single screw extrusion of thermoplastics. *Int. Polym. Process.* 2013, 28, 34–42. [Перекрёстная ссылка]
7. Altinkaynak, A.; Gupta, M.; Spalding, M.A.; Crabtree, S.L. An investigation of the effect of screw geometry on melting in a single-screw extruder. In *Proceedings of the Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, Orlando, FL, USA, 16–20 May 2010.*

Polymers 2020, 12, 1306 12 of 14

8. Tadmor, Z. Fundamentals of plasticating extrusion. I. A theoretical model for melting. *Polym. Eng. Sci.* 1966, 6, 185–190. [Перекрёстная ссылка]
9. Wilczyński, K.; Nastaj, A.; Lewandowski, A.; Wilczyński, K.J. Multipurpose Computer Model for Screw Processing of Plastics. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2012, 51, 626–633. [Перекрёстная ссылка]
10. Baronsky-Probst, J.; Möltgen, C.V.; Kessler, W.; Kessler, R.W. Process design and control of a twin screw hotmelt extrusion for continuous pharmaceutical tamper-resistant tablet production. *Eur. J. Pharm. Sci.* 2016, 87, 14–21. [Перекрёстная ссылка]
11. Laske, S.; Witschnigg, A.; Selvasankar, R.K.; Holzer, C. Measuring the residence time distribution in a twin screw extruder with the use of NIR-spectroscopy. *J. Appl. Polym. Sci.* 2014, 131. [Перекрёстная ссылка]
12. Lewandowski, A. Closely Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extrusion of Polymers. *Chall. Mod. Technol.* 2011, 2, 36–40.

13. Jiang, Q.; Yang, J.; White, J.L. Simulation of screw pumping characteristics for intermeshing counter-rotating twin screw extruders. *Polym. Eng. Sci.* 2011, 51, 37–42. [Перекрёстная ссылка]
14. Shah, A.; Gupta, M. Comparison of the flow in co-rotating and counter-rotating twin-screw extruders. In *Proceedings of the Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, Chicago, IL, USA, 16–20 May 2004.*
15. Senanayake, S.A.M.A.N.S.; Clarke, B. A Simplified twin screw co-rotating food extruder: Design, fabrication and testing. *J. Food Eng.* 1999, 40, 129–137. [Перекрёстная ссылка]
16. Christiano, J.P. Examination of the performance of a high speed single screw extruder for several different extrusion applications. In *Proceedings of the Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, Orlando, FL, USA, 2–4 April 2012.*
17. Lebaal, N. Robust low cost meta-modeling optimization algorithm based on meta-heuristic and knowledge databases approach: Application to polymer extrusion die design. *Finite Elem. Anal. Des.* 2019, 162, 51–66. [Перекрёстная ссылка]
18. Giles, H.F.; Wagner, J.R.; Mount, E.M. *Extrusion: The definitive Processing Guide and Handbook*; William Andrew Inc.: Norwich, NY, USA, 2005; ISBN 0815514735.
19. Kostic, M.M.; Reifschneider, L.G. Design of Extrusion Dies. In *Encyclopedia of Chemical Processing*; Taylor & Francis: Oxfordshire, UK, 2006; pp. 633–649.
20. Sakai, T.; Hashimoto, N.; Kobayashi, N. Experimental comparison between counter-rotation and co-rotation on the twin screw extrusion performance. In *Proceedings of the Annual Technical Conference—Society of Plastics Engineers, Los Angeles, CA, USA, 4–7 May 1987.*

21. White, J.L.; Kim, E.K. *Twin Screw Extrusion: Technology and Principles*; Hanser Publications: Cincinnati, OH, USA, 1991.
22. Padmanabhan, B. Understanding the Extruder Processing Zone: The heart of a twin screw extruder. *Plast. Addit. Compd.* 2008, 10, 30–35. [Перекрёстная ссылка]
23. Janssen, L.P.B.M.; Hollander, R.W.; Spoor, M.W.; Smith, J.M. Residence time distributions in a plasticating twin screw extruder. *AIChE J.* 1979, 25, 345–351. [Перекрёстная ссылка]
24. Rauwendaal, C. *Polymer Extrusion: Fifth Edition*; Carl Hanser Verlag GmbH Co KG: Munich, Germany, 2014; ISBN 9781569905166.
25. Wolf, D.; Holin, N.; White, D.H. Residence time distribution in a commercial twin-screw extruder. *Polym. Eng. Sci.* 1986, 26, 640–646. [Перекрёстная ссылка]
26. Shon, K.; Chang, D.; White, J.L. A Comparative Study of Residence Time Distributions in a Kneader, Continuous Mixer, and Modular Intermeshing Co-Rotating and Counter-Rotating Twin Screw Extruders. *Int. Polym. Process.* 1999, 14, 44–50. [Перекрёстная ссылка]
27. Oh, S.I.; Wu, W.T.; Tang, J.P. Simulations of cold forging processes by the DEFORM system. *J. Mater. Process. Technol.* 1992, 35, 357–370. [Перекрёстная ссылка]
28. Thompson, M.R.; Sun, J. Wet granulation in a twin-screw extruder: Implications of screw design. *J. Pharm. Sci.* 2010, 99, 2090–2103. [Перекрёстная ссылка]
29. Sui, G.; Fuqua, M.A.; Ulven, C.A.; Zhong, W.H. A plant fiber reinforced polymer composite prepared by a twin-screw extruder. *Bioresour. Technol.* 2009, 100, 1246–1251. [Перекрёстная ссылка]
30. Hausnerova, B.; Honkova, N.; Lengalova, A.; Kitano, T.; Saha, P. Rheology and fiber degradation during shear flow of carbon-fiber-reinforced polypropylenes. *Polym. Sci. Ser. A* 2006, 48, 951–960. [Перекрёстная ссылка] *Polymers* 2020, 12, 1306 13 of 14

31. Кye, H.; White, J.L. Simulation of continuous polymerization in a modular intermeshing co-rotating twin screw extruder: Application to caprolactam conversion to polyamide 6. *Int. Polym. Process.* 1996, 11, 129–138. [Перекрёстная ссылка]
32. White, J.L.; Chen, Z. Simulation of non-isothermal flow in modular co-rotating twin screw extrusion. *Polym. Eng. Sci.* 1994, 34, 229–237. [Перекрёстная ссылка]
33. Chen, Z.; White, J.L. Simulation of Non-isothermal Flow in Twin Screw Extrusion. *Int. Polym. Process.* 1994,9, 310–318. [Перекрёстная ссылка]
34. Bang, D.S.; White, J.L. An improved flow simulation model for a tangential counter-rotating twin screw extruder. *Int. Polym. Process.* 1996, 11, 109–114. [Перекрёстная ссылка]
35. Hong, M.H.; White, J.L. Simulation of Flow in an Intermeshing Modular Counter-rotating Twin Screw Extruder: Non-Newtonian and Non-Isothermal Behavior. *Int. Polym. Process.* 1999, 14, 136–143. [Перекрёстная ссылка]
36. Yacu, W.A. Modeling a twin screw co-rotating extruder. *J. Food Process. Eng.* 1985, 8, 1–21. [Перекрёстная ссылка]
37. Wilczynski, K.; White, J.L. Melting Model for Intermeshing Counter-Rotating Twin-Screw Extruders. *Polym. Eng. Sci.* 2003, 43, 1715–1726. [Перекрёстная ссылка]
38. Bawiskar, S.; White, J.L. Solids Conveying and Melting in a Starve Fed Self-wiping Co-rotating Twin Screw Extruder. *Int. Polym. Process.* 1995, 10, 105–110. [Перекрёстная ссылка]
39. Redl, A.; Morel, M.H.; Bonicel, J.; Vergnes, B.; Guilbert, S. Extrusion of wheat gluten plasticized with glycerol: Influence of process conditions on flow behavior, rheological properties, and molecular size distribution. *Cereal Chem.* 1999, 76, 361–370. [Перекрёстная ссылка]

40. Kim, B.J.; White, J.L. Continuous polymerization of lactam-lactone block copolymers in a twin-screw extruder. *J. Appl. Polym. Sci.* 2003, 88, 1429–1437. [Перекрёстная ссылка]
41. Wilczynski, K.; White, J.L. Modeling of twin-screw extrusion. Part I. A model of counter-rotating extrusion. *Polimery* 2008, 53, 754–759. [Перекрёстная ссылка]
42. Farahanchi, A.; Sobkowicz, M.J. Kinetic and process modeling of thermal and mechanical degradation in ultrahigh speed twin screw extrusion. *Polym. Degrad. Stab.* 2017, 138, 40–46. [Перекрёстная ссылка]
43. Ishikawa, T.; Amano, T.; Kihara, S.I.; Funatsu, K. Flow patterns and mixing mechanisms in the screw mixing element of a co-rotating twin-screw extruder. *Polym. Eng. Sci.* 2002, 42, 925–939. [Перекрёстная ссылка]
44. Akdogan, H. Pressure, torque, and energy responses of a twin screw extruder at high moisture contents. *Food Res. Int.* 1996, 29, 423–429. [Перекрёстная ссылка]
45. Wilczyński, K.J.; Nastaj, A.; Lewandowski, A.; Wilczyński, K. A composite model for starve fed single screw extrusion of thermoplastics. *Polym. Eng. Sci.* 2014, 54, 2362–2374. [Перекрёстная ссылка]
46. Breitenbach, J. Melt extrusion: From process to drug delivery technology. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 2002, 54, 107–117. [Перекрёстная ссылка]
47. Puaux, J.P.; Bozga, G.; Ainsler, A. Residence time distribution in a corotating twin-screw extruder. *Chem. Eng. Sci.* 2000, 55, 1641–1651. [Перекрёстная ссылка]
48. Malik, M.; Kalyon, D.M.; Golba, J.C. Simulation of co-rotating twin screw extrusion process subject to pressure-dependent wall slip at barrel and screw surfaces: 3D FEM analysis for combinations of forward - and reverse-conveying screw elements. *Int. Polym. Process.* 2014, 29, 51–62. [Перекрёстная ссылка]
49. Tagliavini, G.; Solari, F.; Montanari, R. CFD simulation of a co-rotating twin-screw extruder: Validation of a rheological model for a starch-based dough for

- snack food. In Proceedings of the International Food Operations and Processing Simulation Workshop, FoodOPS 2016, Larnaca, Cyprus, 26–28 September 2016.
50. Pearson, J.R.A.; Petrie, C.J.S. The flow of a tubular film. Part 1. Formal mathematical representation. *J. Fluid Mech.* 1970, 40, 1–19. [Перекрёстная ссылка]
51. Pearson, J.R.A.; Petrie, C.J.S. The flow of a tubular film Part 2. Interpretation of the model and discussion of solutions. *J. Fluid Mech.* 1970, 42, 609–625. [Перекрёстная ссылка]
52. Vlachopoulos, J.; Sidiropoulos, V. Polymer Film Blowing: Modeling. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2017; ISBN 9780080523583.
53. Wilczyński, K.; Lewandowski, A.; Wilczyński, K.J. Experimental study for starve-fed single screw extrusion of thermoplastics. *Polym. Eng. Sci.* 2012, 52, 1258–1270. [Перекрёстная ссылка]
54. Gautam, A.; Choudhury, G.S. Screw configuration effects on residence time distribution and mixing in twin-screw extruders during extrusion of rice flour. *J. Food Process. Eng.* 1999, 22, 263–285. [Перекрёстная ссылка]
55. Kao, S.V.; Allison, G.R. Residence time distribution in a twin screw extruder. *Polym. Eng. Sci.* 1984, 24, 645–651. [Перекрёстная ссылка]
- Polymers* 2020, 12, 1306 14 of 14
56. Altomare, R.E.; Ghossi, P. An Analysis of Residence Time Distribution Patterns in A Twin Screw Cooking Extruder. *Biotechnol. Prog.* 1986, 2, 157–163. [Перекрёстная ссылка]
57. Van Zuilichem, D.J.; Jager, T.; Stolp, W. Residence time distributions in extrusion cooking. Part II: Single-screw extruders processing maize and soya. *J. Food Eng.* 1988, 7, 197–210. [Перекрёстная ссылка]
58. Van Zuilichem, D.J.; Jager, T.; Stolp, W.; de Swart, J.G. Residence time distributions in extrusion cooking. Part III: Mathematical modelling of the axial

- mixing in a conical, counter-rotating, twin-screw extruder processing maize grits. *J. Food Eng.* 1988, 7, 197–210. [Перекрёстная ссылка]
59. Gogoi, B.K.; Yam, K.L. Relationships between residence time and process variables in a corotating twin-screw extruder. *J. Food Eng.* 1994, 21, 177–196. [Перекрёстная ссылка]
60. Bravo, V.L.; Hrymak, A.N.; Wright, J.D. Numerical simulation of pressure and velocity profiles in kneading elements of a co-rotating twin screw extruder. *Polym. Eng. Sci.* 2000, 40, 525–541. [Перекрёстная ссылка]
61. Crowther, B.G. *Rubber Extrusion: Theory and Development*; Rapra Technology Limited: Akron, OH, USA, 1998.
62. Gonçalves, N.D.; Teixeira, P.; Ferrás, L.L.; Afonso, A.M.; Nóbrega, J.M.; Carneiro, O.S. Design and optimization of an extrusion die for the production of wood-plastic composite profiles. *Polym. Eng. Sci.* 2015, 55, 1849–1855. [Перекрёстная ссылка]
63. Xianghong, W.; Guoqun, Z.; Yiguo, L.; Xinwu, M. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process. *Mater. Sci. Eng. A* 2006, 435, 266–274. [Перекрёстная ссылка]
64. Mount, E., III. Coextrusion equipment for multilayer flat films and sheets. In *Multilayer Flexible Packaging*, 2nd ed.; Wagner, J.R., Ed.; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, 2010.
65. Gupta, M. Three-dimensional simulation of coextrusion in a complex profile die. In *Proceedings of the Annual Technical Conference—ANTEC*, Conference Proceedings, Orlando, FL, USA, 16–20 May 2010.
66. Bengtsson, M.; Le Baillif, M.; Oksman, K. Extrusion and mechanical properties of highly filled cellulose fibre-polypropylene composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2007, 38, 1922–1931. [Перекрёстная ссылка]
67. Grande, C.; Torres, F.G. Investigation of fiber organization and damage during single screw extrusion of natural fiber reinforced thermoplastics. *Adv. Polym. Technol.* 2005, 24, 145–156. [Перекрёстная ссылка]

68. Bigg, D.M. Effect of compounding on the properties of short fiber reinforced injection moldable thermoplastic composites. *Polym. Compos.* 1985, 6, 20–28. [Перекрёстная ссылка]
69. Gunning, M.A.; Geever, L.M.; Killion, J.A.; Lyons, J.G.; Higginbotham, C.L. Mechanical and biodegradation performance of short natural fibre polyhydroxybutyrate composites. *Polym. Test.* 2013, 32, 1603–1611. [Перекрёстная ссылка]
70. Ville, J.; Inceoglu, F.; Ghamri, N.; Pradel, J.L.; Durin, A.; Valette, R.; Vergnes, B. A study of fiber breakageduring compounding in a Buss kneader. *Int. Polym. Process.* 2012, 27, 245–251. [Перекрёстная ссылка]
71. Ramani, K.; Bank, D.; Kraemer, N. Effect of screw design on fiber damage in extrusion compounding and composite properties. *Polym. Compos.* 1995, 16, 258–266. [Перекрёстная ссылка]
72. Albrecht, K.; Osswald, T.; Baur, E.; Meier, T.; Wartzack, S.; Müssig, J. Fibre Length Reduction in Natural Fibre-Reinforced Polymers during Compounding and Injection Moulding—Experiments Versus Numerical Prediction of Fibre Breakage. *J. Compos. Sci.* 2018, 2, 20. [Перекрёстная ссылка]
73. Berzin, F.; Beaugrand, J.; Dobosz, S.; Budtova, T.; Vergnes, B. Lignocellulosic fiber breakage in a moltenpolymer. Part 3. Modeling of the dimensional change of the fibers during compounding by twin screw extrusion. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2017, 101, 422–431. [Перекрёстная ссылка]
74. Zhang, S.; Wang, P.; Tan, L.; Huang, H.; Jiang, G. Relationship between screw structure and properties of recycled glass fiber reinforced flame retardant nylon 46. *RSC Adv.* 2015, 5, 13296–13306. [Перекрёстная ссылка]
75. Quijano-Solis, C.; Yan, N.; Zhang, S.Y. Effect of mixing conditions and initial fiber morphology on fiberdimensions after processing. *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.* 2009, 40, 351–358. [Перекрёстная ссылка]

76. Wilczyński, K.; Buziak, K.; Wilczyński, K.J.; Lewandowski, A.; Nastaj, A. Computer modeling for single-screw extrusion of wood-plastic composites. *Polymers (Basel)* 2018, 10, 295. [Перекрёстная ссылка]
77. Abeykoon, S.; Kelly, A.L.; Vera-Sorroche, J.; Brown, E.C.; Coates, P.D.; Deng, J.; Li, K.; Harkin-Jones, E.; Price, M. Process efficiency in polymer extrusion: Correlation between the energy demand and melt thermal stability. *Appl. Energy* 2014, 135, 560–571. [Перекрёстная ссылка]

© Стефанович М.А., Губачев В.А., Толстов А.М., 2022 *Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №2/2022.*

Для цитирования: Стефанович М.А., Губачев В.А., Толстов А.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ// *Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №2/2022*