



АНАЛИЗ РАБОТЫ СОВРЕМЕННОГО ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА

Наталья Готовко,
Климовский трубный завод
Владимир Швабауэр,
НТЦ «Пластик»

Экструдер является наиболее важной частью оборудования для переработки полимерных материалов. Опережающий рост единичной производительности экструдера стимулирует разработку совершенных конструкций формующего, калибрующего и охлаждающего оборудования.

Авторам представилась возможность поработать с большим числом экструдеров различных фирм и различных поколений, что позволяет сделать некоторые выводы и обобщения.

Одношнековый экструдер с момента его создания (1935 год) работал как винтовой насос, в котором давление расплава создавалось на последних витках шнека в зоне нагнетания (дозирования). От известных с конца позапрошлого века «шприцмашин» для переработки резины экструдер отличался лишь длиной и геометрией шнека, приспособленной к реоло-

гическим и теплофизическим свойствам расплава полимера. Несмотря на то, что к 1965 году фактически имелось полное количественное описание экструзионного процесса от загрузочного бункера до формующего инструмента, экструдер оставался весьма несовершенным и, по сегодняшним меркам, малопродуктивным.



Рис. 1. «Входная» зона шнека. На трех последних витках (нижнее фото) начинается «барьер»

С середины 70-х годов прошлого века в Германии начались интенсивные исследования и массовые выпуски экструдеров с продольным рифлением цилиндра в зоне загрузки. Это было своего рода революцией на почти полувековом пути развития теории и практики экструзионного процесса.

С применением в зоне загрузки рифленых охлаждаемых втулок принцип работы экструдера резко изменился. Винт шнека, конечно же, продолжает работать на нагнетание (законы гидродинамики сплошных сред никто не отменял), но определяющим в движении полимера в экструдере стала «транспортующая, толкающая способность» зоны загрузки, в 3-5 раз превышающая напорную производительность зоны дозирования. Американские исследователи долгое время игнорировали очевидные успехи западногерманских специалистов, сосредоточив все свое внимание исключительно на проблеме плавления материала в витках шнека.

Первые экструдеры, снабженные рифленой втулкой (ТПМ 63; ТПМ 90; ТПМ 150 и ТПМ 200) фирмы «Тиссен Пластик Maschinen» появились в СССР с закупкой оборудования для Казанского трубного завода (1980-е гг.) и поражали своей невиданно высокой производительностью. Непривычным выглядел и шнек, имеющий одинаковую глубину нарезки по всей его длине. На конце шнека имелся прообраз современного смесительного элемента.

После начального участка длиной около $5D$ (с рифлением на цилиндре) шнек может вообще не иметь привычной нарезки с функцией транспортирования и должен иметь конфигурацию, максимально отвечающую задаче плавления полимера.

Наиболее полно, как показывает практика, эту задачу решает так называемый барьерный шнек. Не последнюю роль в этом сыграли результаты исследований американских специалистов.

Нагрев и плавление полимера в современном экструдере происходит в основном за счет механической энергии вращения шнека. Механическая энергия наиболее эффективно расходуется и переходит в тепловую в зонах «сухого» трения полимера о металлические поверхности шнека и цилиндра экструдера. Расплав полимера, хотя и имеет высокую вязкость (коэффициент трения), в этом смысле не может конкурировать с трением, возникающим в твердом полимере (или в весьма тонкой прослойке образовавшегося расплава) при высоких контактных давлениях и скоростях движения.

В барьерном шнеке образовавшийся на первой трети его длины расплав начинает отделяться от твердой фазы, которая продолжает уплотняться с эффективным выделением тепла для полного (или почти полного) своего плавления. Длина «барьера» составляет приблизительно треть длины шнека, и на выходе из него мы имеем полностью расплавленный полимер, возможно, с небольшой долей твердой фракции.

Оставшаяся длина шнека предназначена для выравнивания температуры в потоке расплава (температурная гомогенизация). Этому процессу способствуют смесительные элементы той или иной конструкции, устанавливаемые в этой части шнека.

Вот каков осевой функциональный разрез современного шнека общей длиной 36-37 D :



Рис. 2. «Барьерная» зона шнека (заканчивается в середине нижней фотографии)

На длине около $10 D$ происходит уплотнение и разогрев полимера до температуры плавления; начало плавления. Объем витка на этой длине меняется незначительно, то есть уплотнение материала определяется «толкающей» способностью рифленой втулки и сопротивлением «барьера», а не «степенью сжатия» шнека в этой зоне.

На длине от $10 D$ до $29 D$ происходит плавление. При этом расплав сепарируется во вновь образованный дополнительный виток (виток Майллефера), объем которого монотонно увеличивается к концу этого участка, тогда как объем основного витка сходит к нулю, что, по сути, и является барьером для выхода из этой зоны нерасплавленного материала.

Барьерный шнек изобретен и, до последнего времени, применялся в США без рифленой втулки. В этом варианте велика вероятность, что при повышении скорости вращения шнека (производительности) твердая пробка не успеет расплавиться и закупорит барьер. На практике это приводит к пульсации производительности. Поэтому барьерный шнек без установки в зоне загрузки рифленой втулки часто проигрывал по отношению к традиционному «компрессионному» шнеку по стабильности в работе.

В Европе барьерный шнек начал применяться только в сочетании с рифленой зоной загрузки, когда стало возможным игнорировать запирающее действие барьера. И теперь это сочетание – «рифление в зоне загрузки + барьерный шнек» – стало общепринятым во всем мире.

Непосредственным продолжением зоны плавления является смесительный элемент – так называемая «торпеда» (рис. 3).

По сути, это тоже барьер, только не винтовой, а «пробковый». В цилиндре наружным диаметром, рав-

ным внутреннему диаметру цилиндра экструдера, выполнены пары продольных пазов, один из которых открыт со стороны входа, но заглушен на выходе, другой, наоборот, открыт на выход. Расплав втекает в открытый на вход паз и по узкой радиальной щели, выполненной между пазами, перетекает в соседний, открытый на выход. Таких пар пазов – от 6 до 12, в зависимости от диаметра шнека. Длина «торпеды» – около $5 D$, высота щели не превышает 1 мм (для шнека диаметром 90 мм). Кроме очевидного гомогенизирующего действия, «торпеда» создает существенное (по нашим оценкам, до 100 бар) гидравлическое сопротивление течению расплава в шнеке, что никак не сказывается на его производительности, но повышает гомогенизирующую способность предыдущих

Рис. 3. «Торпеда» на конце шнека относительной длины $32 D$



Таблица 1.

| Экструдер | $D_{ш}$, мм | t , мм | h_3 , мм | n , 1/мин (м/с) | Q_3 , кг/час | Q_3/n |
|-------------------|--------------|----------|------------|-------------------|----------------|-------------|
| ЧП 160 | 160 | 160 | 18 | 60 (0,5) | 270 | 4,5 |
| ТРМ 150 | 150 | 150 | 10,6 | 50 (0,4) | 490 | 9,8 |
| Proton 120 | 120 | 100 | 11,0 | 105 (0,66) | 1030 | 9,8 |
| КМЕ 125 | 125 | 125 | 11 | 100 (0,65) | 1400 | 14 |
| ЧП 90 (до1985 г.) | 90 | 90 | 4 | 100 (0,47) | 130 | 1,3 |
| ТРМ 90 | 90 | 90 | 8,2 | 90 (0,42) | 300 | 3,33 |
| К 90 (Китай) | 90 | 90 | 10 | 120 (0,56) | 650 | 5,4 |
| Proton 90 | 90 | 80 | 10,6 | 150 (0,7) | 830 | 5,4 |
| КМЕ 90 | 90 | 90 | 11,2 | 155 (0,73) | 1000 | 6,45 |
| Monos 90 | 90 | 70 | 11,5 | 184 (0,86) | 1050 | 5,68 |
| Monos+ 90 | 90 | | | 187 (0,88) | 1400 | 7,48 |
| К 75 (Китай) | 75 | 75 | 9 | 150 (0,59) | 500 | 3,3 |
| Proton 75 | 75 | | | 170 (0,66) | 560 | 3,3 |
| Proton 60 | 60 | 50 | 6,7 | 200 (0,63) | 300 | 1,5 |
| КМЕ 60 | 60 | 60 | 8 | 180 (0,56) | 360 | 2,0 |
| Rapidex | 60 | | | 650 (2,04) | 1400 | 2,15 |

зон шнека. Несколько раньше, когда эффективная длина шнека не превышала $32 D$, этим элементом (или более ранней его разновидностью – «пропеллером») шнек и заканчивался.

Современный шнек (длиной $37 D$) имеет два последовательно установленных смесительных элемента – «торпеду», чаще всего более современную, винтовую, и «пропеллер». Общая длина этой зоны составляет около $8 D$.

Проследив эволюцию конструкции шнека, перейдем к некоторым практическим наблюдениям за работой экструдеров.

Сравнительной характеристикой «степени совершенства» экструдеров одного диаметра шнека явля-

ется **производительность на один оборот шнека** = Q_3/n .

Ранжирование обследованных экструдеров по этому показателю проведено в Таблице 1.

Обозначения: Q_3 – производительность; $D_{ш}$ – диаметр шнека; h_3 – глубина нарезки шнека в зоне загрузки; t – шаг нарезки шнека; n – число оборотов шнека.

Проследим за характеристиками экструдеров с диаметром шнека 90 мм. Сравнение экструдеров ЧП («Большевик») и ТРМ – чисто историческое. Применение рифления позволило повысить производительность экструдера в 2,5 раза.

Китайские экструдеры, в целом грамотно копирующие дизайн шнека и рифленой втулки экструдеров

Рис. 4. «Гомогенизирующая» зона шнека



серии Proton (фирмы Cincinnati Extrusion) имеют неплохие удельные показатели эффективности работы шнека (сравним также K 75 и Proton 75), однако оснащены приводом меньшей мощности и с меньшим максимальным числом оборотов шнека.

Несколько более поздняя, чем Proton 90, модель КМЕ 90 (фирма Krauss-Maffei) имеет большую производительность при сходных числах оборотов шнека. Из сравнения величин h_3 и t в таблице 1 видно, что шнеки КМЕ в зоне загрузки имеют больший объем витка, чем у Proton. Напрашивается вывод, что фирма Krauss-Maffei на первом этапе соревнования с фирмой Cincinnati повысила производительность экструдера исключительно тем, что расширила объем витка шнека в зоне питания. Конечно, фирма ввела в конструкцию шнека и другие изменения (в том числе удлинена шнек до 36 D), так как необходимо было расплавить и гомогенизировать большее количество материала.

Monos 90, сменивший Proton 90 «подскокил» в производительности до уровня КМЕ 90 только за счет увеличения числа оборотов от 150 до 184 об/мин при фактически сохранных удельных характеристиках шнека ($Q_3/n = 5,4$ и $5,68$).

Monos+ 90 подвергнут существенной модернизации ($Q_3/n = 7,48$): «винтовое» рифление загрузочной втулки вместо «осевого» и более глубокий шнек в этой зоне. К слову, ускоренная модернизация экструдеров в последние годы во многом связана с технической конкуренцией фирм Krauss-Maffei и Cincinnati.

За год эксплуатации экструдеров Monos+ 90 на Климовском трубном заводе выявлены слабые места материального цилиндра в зоне максимального уплотнения материала (перед входом в «барьер»). В этой зоне в экструдере действительно развивается максимальное давление. Однако, для того, чтобы разрушить цилиндр, выполненный из высококачественного материала, требуется давление более 3000 бар. Специалисты фирмы Cincinnati считают, что последняя модификация зоны загрузки и геометрии шнека (успешные в технологическом отношении) привели к предельному прочностному состоянию в месте, где на максимальные касательные напряжения кручения цилиндра накладываются напряжения максимального внутреннего давления. Следующие экземпляры цилиндров экструдеров Monos+ 90 будут иметь повышенную толщину и изготавливаться из более качественного металла.

В заключение рассмотрим экструдер Rapidex. Экструдер имеет одинаковые с КМЕ 60 удельные показатели работы шнека (загрузочной зоны). Разработчики экструдера Rapidex подняли производительность за счет **более чем трехкратного увеличения числа оборотов** шнека.

Отметим, что, задавая максимальное число оборотов шнека, конструкторы рассмотренных нами экструдеров, **не превышают значение окружной скорости гребня шнека 0,9 м/сек.** Их опасения, что более серьезная «раскрутка» шнека приведет к перегреву расплава, вполне обоснованы. «Быстроходные»

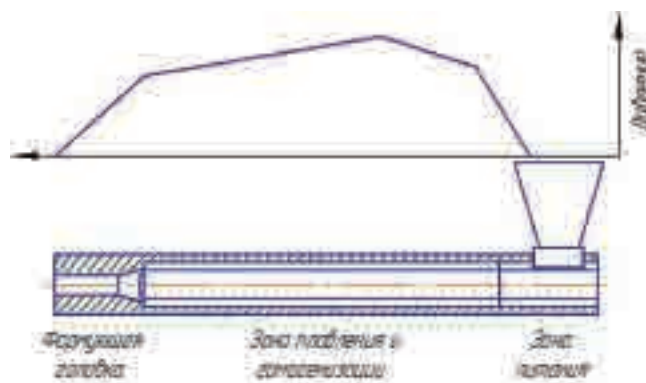


Рис. 5. Эпюра распределения давления по длине экструзии

шнеки давно используются для переработки низковязких материалов и для производства простейших изделий типа тонкого листа для вакуумного формования, в кабельной промышленности, когда перегрев расплава не критичен. Разработчики экструдера Rapidex (фирма Cincinnati) уже два года используют его для производства труб из ПЭ 100 (1000 кг/час) и ПП (800 кг/час), а в конце 2007 года сделали «заявку» на 1600 кг/час (в рабочем режиме 1450 кг/час).

Напомним, что экструдер Monos+ 90 в привычном диапазоне чисел оборотов шнека дает производительность 1300 кг/час (максимально до 1400). Другие преимущества экструдера Rapidex (цитируем разработчиков) – малая длина, позволяющая увеличить длину охлаждения трубы; малое время пребывания расплава в экструдере, позволяющее максимально сохранить свойства сырья; отсутствие редуктора, обеспечивающее экономию масла и повышение КПД затрат мощности; компактность, снижающая тепловыделение в окружающую среду, и др. – вероятно, не компенсируют в полной мере невозможности регулировать (снижать) температуру расплава иначе, как, уменьшая число оборотов шнека, то есть производительность экструзии. Кроме того, остается открытым вопрос о возможном повышенном износе рабочих поверхностей шнека и цилиндра в условиях высокооборотистой эксплуатации.

В заключение хотелось бы отметить, что ускорение технического развития последних лет привело к появлению на рынке целого ряда концептуально новых экструдеров со значительно повышенной производительностью и, зачастую, уникальными характеристиками. Климовский трубный завод Группы ПОЛИПЛАСТИК одним из первых европейских производителей, совместно с ведущими европейскими машиностроительными фирмами, более двух лет занимается испытаниями и внедрением новых высокоэффективных типов экструдеров. Окончательно их достоинства и возможные недостатки покажет время, но уже сейчас понятно, что создана новая техническая концепция экструзионного оборудования для производства труб, которая во многом будет определять параметры дальнейшего развития технологии и отрасли.