

# ОХЛАЖДЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ

## В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИИ

**С начала 2007 года на Климовском трубном заводе запущен процесс внутреннего охлаждения труб диаметром 315–800 мм с интенсивностью, сопоставимой с интенсивностью внешнего охлаждения.**

**Владимир Бисеров, Игорь Гвоздев, Мирон Горюловский, Владимир Швабауэр**

Переработка термопласта в изделие, в том числе и экструзией, состоит исключительно из процессов его нагрева (плавления) и охлаждения. Формование же изделия (скажем, впрыск расплава в литьевую форму или его продавливание через формующий инструмент) – процесс весьма скоротечный, и если и представляет какие-то проблемы, то не с точки зрения затрат времени на его осуществление.

Нагрев полимера в работающем экструдере происходит в основном за счет диссипации энергии главного привода, а перенос тепловой энергии – конвекцией. Современное экструзионное оборудование позволяет без особых проблем качественно подготовить для формования до двух тонн расплава в час.

Охлаждение же изделия происходит только по механизму теплопроводности, а это на порядки более медленный процесс, поэтому именно время, необходимое для охлаждения изделия, определяет производительность любого агрегата, выпускающего то или иное изделие из термопласта.

Температурное поле в стенке полимерной трубы описывается нелинейным дифференциальным уравнением теплопроводности в частных производных:

$$\frac{\delta T(y, \tau)}{\delta \tau} = A(T) \frac{\delta^2 T(y, \tau)}{\delta y^2} + D(T) \left( \frac{\delta T(y, \tau)}{\delta y} \right)^2 \quad (1)$$

где:  $T(y, \tau)$  – температура в стенке трубы, функция координаты и времени, °C;

$y$  – координата поперек стенки трубы, м;

$\tau$  – время от начала охлаждения, с;

$A(T)$  – коэффициент температуропроводности, функция температуры, м<sup>2</sup>/с;

$D(T)$  – первая производная коэффициента температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Уравнение (1) для переменных теплофизических характеристик материала не имеет точного аналитического решения, но его уже давно с легкостью интегрируют численными методами. В результате интегрирования получаем время охлаждения, что при заданной производительности экструзии и весе погонного метра трубы дает так называемую длину охлаждения (длину охлаждающих ванн). На рис. 1 показан процесс охлаждения трубы диаметром 630 мм, SDR 11 при производительности 1000 кг/час. В данном случае отслеживается изменение температуры снаружи трубы ( $y = 0$ ), внутри трубы ( $y = S$ ) и в трех промежуточных по толщине стенки трубы точках.

Из рисунка видно, что наружная поверхность практически сразу принимает температуру орошающей её воды (20°C), тогда как внутренняя затвердевает только через 4 часа (длина охлаждения 36 м). После 42 метров (7 ванн длиной по 6 м) принудительное охлаждение трубы прекращено. В этот момент температура в стенке трубы практически линейно распределена от 90°C на внутренней поверхности до 20°C – на внешней. При подходе к отрезному устройству, то есть приблизительно через полтора часа, температура в стенке трубы усредняется на уровне 60-65°C.

Подобную картину можно получить для охлаждения трубы любых габаритов и для любой производительности процесса. Однако на практике для определения необходимой длины охлаждения достаточно воспользоваться следующим соотношением:

$$L_{\text{охл}} = K_{\text{охл}} \cdot Q_3 / (\text{SDR}) \quad [\text{м}] \quad (2)$$

где:  $Q_3$  – производительность экструзии, кг/час;

$K_{\text{охл}}$  – численный коэффициент, зависящий от условий охлаждения (см. табл. 1);

SDR – отношение номинального наружного диаметра к номинальной толщине стенки трубы (стандартное размерное отношение).

**Табл. 1. Значения коэффициента  $K_{охл}$  для различных условий охлаждения трубы**

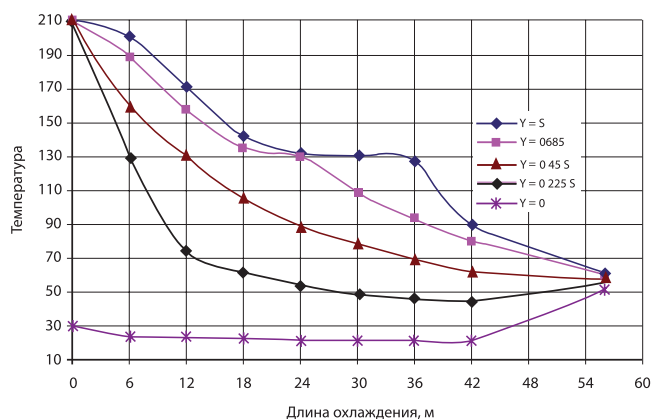
Температура охлаждающей воды, °C	10	20	30	40
Усредненная температура трубы на выходе, °C	$K_{охл}$			
30	0,53	0,65	-	-
40	0,48	0,6	0,72	-
50	0,41	0,5	0,61	0,77

Интересно, что в уравнение (2) не входит диаметр трубы, а только SDR. Это означает, что и труба диаметром 110 мм, и труба диаметром 1200 мм одного SDR при одинаковой производительности потребуют одинаковой длины охлаждения. Определим ее, например, для производительности 1000 кг/час, труба SDR 11, температура охлаждающей воды 20°C и усредненная температура трубы на выходе из процесса 50°C ( $K_{охл} = 0,5$ ).

$$L_{охл} = 0,5 \cdot 1000 / 11 = 45 \text{ м}$$

В случае, рассмотренном на рис. 1, мы имеем меньшую длину охлаждения, и труба выходит несколько более горячей.

Рис. 1. Распределение температуры в стенке трубы по мере ее охлаждения



Изменение теплосодержания полиэтилена высокой плотности при его охлаждении от 220°C до 30–40°C составляет 600–650 кДж/кг (кВт·с/кг). Именно это количество тепла отводится от трубы охлаждающей водой, а затем от воды в холодильном агрегате. Таким образом, на каждые 1000 кг/час производительности экструзии трубы необходима следующая «мощность теплосъема»:

$$N_{TC} = 600 \cdot 1000 / 3600 = 166 \text{ кВт}$$

С применением оросительных ванн с интенсивным и равномерным поливом трубы водой возможности интенсификации традиционного процесса охлаждения трубы исчерпываются. При этом мы показали, что для охлаждения трубы SDR 11 при производительности

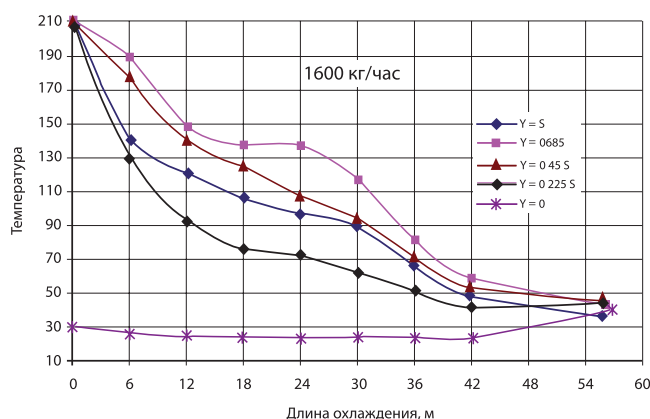
1000 кг/час необходимая длина ванн составляет не менее 50 м. Если к ним прибавить длину зоны расположения тянущего и отрезного устройств, то только после изготовления не менее 60 метров трубы аппаратчик сможет реально проконтролировать ее геометрические параметры. А 60 метров бракованной трубы диаметром 630 мм SDR 11 – это затрата не менее 6,5 тонн сырья и 2340 кВт·час электроэнергии. Конечно, современные методы контроля технологического процесса (гравиметрия, ультразвуковые измерители толщины стенки) и накопленный опыт не допускают таких ошеломляющих потерь при каждом запуске процесса, но риск вполне реален.

Существенно изменить показатели процесса охлаждения возможно только при использовании технологии охлаждения трубы изнутри. Разработкой таких технологий занимаются все ведущие фирмы-производители трубного оборудования, но пока еще ни одна из них не вышла на рынок с законченным процессом.

Специалисты Климовского трубного завода совместно с НТЦ «Пластик» занимаются разработкой такой технологии и соответствующего оборудования с 2004 года. Традиционная схема формования заготовки трубы была существенно изменена, и с начала 2007 года на Климовском трубном заводе запущен в промышленную эксплуатацию процесс внутреннего охлаждения труб диаметром 315–800 мм с интенсивностью, сопоставимой с интенсивностью внешнего охлаждения. Способ двухстороннего охлаждения и оборудование для его осуществления в настоящее время патентуется. Предложенная схема существенно расширяет технологические возможности управления процессом охлаждения трубы, и со временем мы ожидаем достижения более широкого спектра результатов, чем рассмотренный ниже.

На рис. 2 представлена картина охлаждения той же трубы (диаметр 630 мм SDR 11), но при производительности 1600 кг/час, когда задействовано внутреннее охлаждение.

Рис. 2. Распределение температуры в стенке трубы при ее двухстороннем охлаждении (производительность экструзии 1600 кг/час).

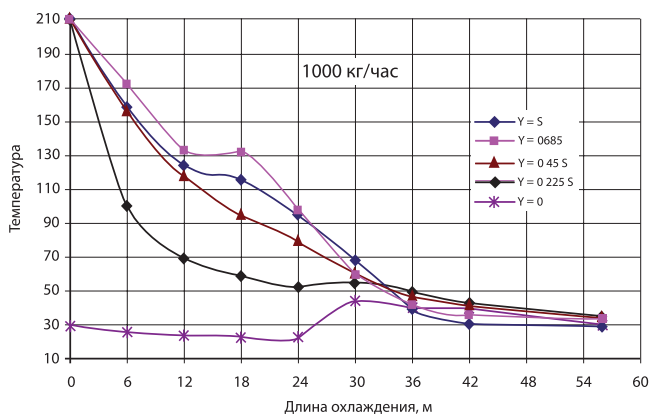


После 42 метров внешнее охлаждение трубы также прекращено. В этот момент температура в стенке

трубы составляет 20-50°C. При подходе к отрезному устройству температура в стенке трубы усредняется на уровне 30-35°C.

Мы пока не имеем в своем распоряжении экструдера с производительностью 1600 кг/час, поэтому на рис. 2 отражена ситуация будущего. Реально же, при производительности 1000 кг/час, введение внутреннего охлаждения позволило нам из имеющихся в линии семи охлаждающих ванн отключить три последние, т.е. длина внешнего охлаждения составила 24 м (рис. 3).

Рис. 3. Распределение температуры в стенке трубы по мере ее двухстороннего охлаждения (производительность экструзии 1000 кг/час).



Какие еще результаты мы получили, кроме того, что **на 40% уменьшили длину охлаждения, а на выходе получили более холодную трубу (30°C вместо 60°C)?**

1. Предварительный расчет теплового баланса показывает, что «мощность теплосъема» от внутренней поверхности составляет 65–70 кВт. **Так как это тепло утилизируется нами без затрат энергии, на эту же величину снижается «холодильная» нагрузка в системе общего водооборота.**

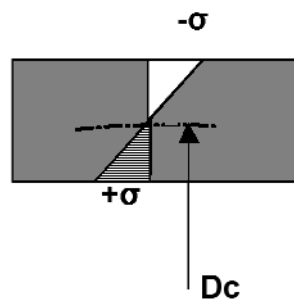
2. Из сравнения рис. 2 и 3 с рис. 1 видно, что с применением двухстороннего охлаждения внутренняя поверхность заготовки охлаждается до температуры затвердевания за время, втрое меньшее, чем при одностороннем. Это обстоятельство **существенно уменьшает эффект стекания расплава при производстве крупногабаритных труб и позволяет достигать приемлемой разнотолщинности трубы** даже без применения специальных «нестекающих» композиций полиэтилена.

3. Заметно уменьшилась «бочкообразность» концов отрезков труб, что говорит о существенном снижении уровня внутренних напряжений в стенке трубы. **Это должно благоприятно сказаться на эксплуатационных характеристиках трубы и процессе ее сварки встык.**

Известно, что на стадии охлаждения трубы в ее стенке образуются внутренние (так называемые «замороженные») напряжения. Надо отметить, что напряжения являются взаимно уравновешен-

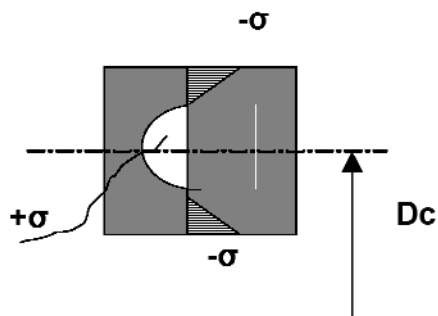
ными и проявляются только на концах отрезка трубы, придавая им бочкообразную форму (рис. 4).

Рис. 4. «Замороженные» напряжения при внешнем охлаждении



При литье фитингов изделие одинаково охлаждается и изнутри, и снаружи, и напряжения сжатия возникают и на внутренней стенке (рис. 5). Соответственно, возникает баланс положительных и отрицательных напряжений, не дающий искажения формы, если фитинг (или так же охлажденную трубу) разрезать.

Рис. 5. «Замороженные» напряжения при двухстороннем охлаждении



Один из способов оценки уровня внутренних напряжений следующий.

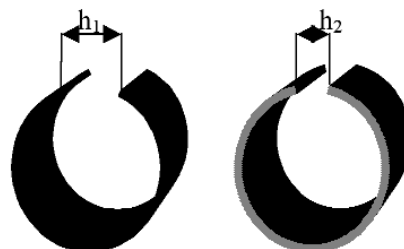
Если в отрезке трубы вдоль оси вырезать щель шириной  $h_1$ , высвободившиеся напряжения вызовут изменение ее периметра, и ширина разреза сократится (рис. 6).

Обозначив  $a = h_1 - h_2$ , абсолютную величину напряжения определяют по уравнению:

$$\pm \sigma = \frac{a E}{(\pi D_c - a) (SDR)} \quad (3)$$

Где: E – модуль упругости материала, МПа.

Рис. 6. К расчету «замороженных» напряжений



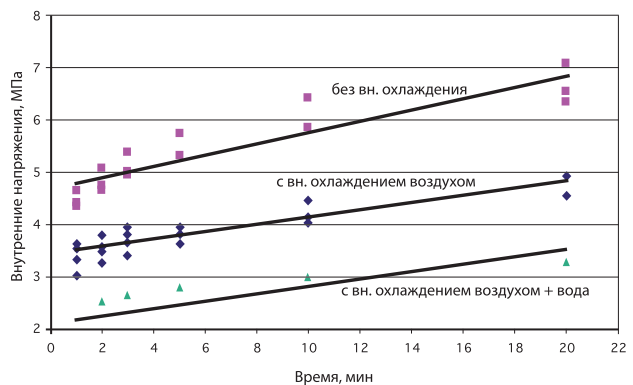
«Мгновенно» достигнув после разрезки определенной величины, ширина  $h_2$  продолжает со временем уменьшаться (величина  $a$  – возрастает). По уравнению (3) это означает, что напряжения  $\sigma$  возрастают со временем (рис. 7), что на самом деле невозможно. В действительности, «замороженные» напряжения продолжают сокращать периметр разрезанного кольца по механизму ползучести. Определить «мгновенную» величину  $h_2$  можно только с большой ошибкой, поэтому наблюдение за ее изменением ведут какое-то время непрерывно, а для расчета у принимают время, равное 3 минутам, при величине  $E = 900$  МПа.

С учетом этих условий, накопленные к настоящему времени измерения дают следующую оценку уровня внутренних напряжений в стенке трубы:  $\approx 5$  МПа – без применения внутреннего охлаждения и  $\approx 2,5$  МПа – с внутренним охлаждением.

Понятно, что все трубы – и те, которые тестируются на гидравлических стендах, и те которые находятся в эксплуатации, – имеют «замороженные» напряжения по природе их изготовления. И хотя со временем в процессе релаксации они уменьшаются (за 10 лет примерно вдвое), возможность их изначального уменьшения приведет к более надежной работе напорного трубопровода.

В сентябре 2007 года началась опытно-промышленная эксплуатация линии по производству труб диаметрами 315-800 мм с производительностью до 1450 кг/ч, а с февраля 2008 г. планируется освоение процесса внутреннего охлаждения для труб диаметром до 1200 мм. Надеемся, что практические результаты на этих установках полностью подтвердят расчетные и уже имеющиеся практические показатели и позволят говорить о кардинально новом подходе к технологии производства полиэтиленовых труб.

Рис. 7. Данные измерений внутренних напряжений в трубах





**Балт  
ПРОЕКТ**  
Санкт-Петербург

## На шаг впереди конкурентов!

### Оборудование для бестраншейного ремонта и прокладки сетей

**Промывка сетей**



**Сварка п/э труб**



**ТВ-инспекция**



**Бурение**





**Разрушители труб:**

- PIPEBURSTER T30\*** 40-200 мм
- T40** 50-315 мм
- T65** 60-355 мм
- T85** 60-450 мм
- T125** 75-520 мм
- T175\*** 90-710 мм
- T350** 150-1400 мм

\* - НОВИНКА

ООО "БАЛТПРОЕКТ"  
(812) 327-11-55, 542-85-55

**SCANDINAVIAN TOOL DIG CENTRE**

[www.baltproject.spb.ru](http://www.baltproject.spb.ru)