

6. Пап Л. Концентрирование вымораживанием. –М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982, 96 с.
7. Акопян В.Б., Бамбура М.В., Давидов Е.Р., Ступин А.Ю., Чубатова О.И. Ультразвуковой метод концентрирования поверхностно-активных веществ их водных растворов // Журнал физической химии, 2010, 84, № 3, с. 425–428.
8. Шелудко А. Коллоидная химия / Пер. с болгар.; Под ред. Б.В. Дерягина, Е.Д. Щукина. –М.: Мир, 1984.
9. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Главн. редак. И.П. Голямина. –М.: Советская энциклопедия -1989. 399 с.
10. Акопян В.Б., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами (ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии). – М., Изд-во РГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005, 300 с.
11. <http://izvestia.asu.ru/2012/3-2/chem/TheNewsOfASU-2012-3-2-chem-06.pdf>
12. Евстратова К.И., Купина Н.А., Малахова Е.Е. Физическая и коллоидная химия. –М: Высшая школа, 1990 г., 487 с.
13. chemister.ru/Database/properties.php?dbid=1&id=6
14. Власов М.А., Пожидаев Г. И., Красенков Г.И., Ганиев Ю. Способ и устройство разделения жидкостей на фракции различной плотности. Патент № 237123

Расчёт тепловых режимов и прогнозирование работы пресс-форм для литья пластмасс под давлением

Зюков Е.А.¹, д.т.н. проф. Булатов М.А.¹, Дувидзон В.Г.²

¹Университет машиностроения

²«ИФ АБ Универсал»,

8 (926) 831-07-13, EvgeshaPo@mail.ru

Аннотация. Составлена математическая модель процесса образования осадков в каналах охлаждения литевых форм, экспериментально определены показатели работы системы охлаждения и разработан программный модуль для расчета коэффициента теплопередачи. Уточнена методика расчета системы охлаждения, введена оценка эффективности охлаждения, позволяющая прогнозировать работоспособность литевой формы. На примере прессования детали из полипропилена определено время цикла прессования и межремонтного пробега горячеканальной литевой формы.

Ключевые слова: пресс-форма, каналы охлаждения, время охлаждения, время цикла, твердые осадки

Введение

Система охлаждения литевой формы предназначена для отвода из рабочей зоны тепла, поступающего с расплавом. Цикл литья полимерного изделия определяется временем его охлаждения. Вследствие образования осадков, старения и коррозии теплопередающих поверхностей каналов охлаждения существующие методы расчета тепловых режимов не позволяют прогнозировать и оперативно управлять процессом литья под давлением.

Оценка работоспособности системы охлаждения литевой формы

Эффективно работающая система охлаждения пресс-формы должна за время цикла должна обеспечить отвод тепла Q_M , которое можно в первом приближении оценить:

$$Q_M = \frac{c_p m (T_H - T_K)}{t_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где c_p – средняя теплоёмкость полимера в пределах температур его пребывания в пресс-форме, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$;

m – масса отливки, кг.

Интенсивность охлаждения и его равномерность зависят от расположения каналов охлаждения относительно формообразующих поверхностей пресс-формы (рисунок 1, поз. 2, 5).

Недостаточная интенсивность охлаждения приводит к увеличению цикла литья $t_{\text{ц}}$ [1] и к удорожанию отливки.:

$$\tau_y = 1,3 \cdot \tau_0 \quad (2)$$

$$t_o = -\frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\delta}{\alpha} \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{T_k - T_{\text{Ф}}}{T_{\text{Л}} - T_{\text{Ф}}}\right), \quad (3)$$

где t_o – время охлаждения, с; δ – толщина стенки изделия, м; α – коэффициент температуропроводности полимера, $\text{м}^2\text{с}$; T_k , $T_{\text{Ф}}$, $T_{\text{Л}}$ – температура до которой охлаждается изделие, температура формы, температура поступающего в форму расплава, $^\circ\text{C}$.

Количество тепла Q_F , которое способна отвести система охлаждения

$$Q_F = K_T F (T_{\text{Ф}} - T_K), \quad (4)$$

где K_T – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}}$.

Конструкция системы охлаждения работоспособна, если:

$$Q_F \geq Q_M \quad (5)$$

Существующая методика расчета [1] позволяет определить диапазон изменения значений диаметров каналов охлаждения при выполнении условия (5).

Величину коэффициента K_T определяли в виде:

$$K_T = \frac{1}{\delta_w / \lambda_w + 1/\alpha} \quad (6)$$

где δ_w – характерное расстояние от формообразующей поверхности до канала системы охлаждения, м; λ_w – теплопроводность металла формы, $\frac{\text{кВт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$.

Например, отливаемая деталь – контейнер из полипропилена объемом 950 мл, с толщиной стенки – 1 мм, масса детали – 0,032 кг, габариты формы – 296 x 296 x 290 мм, диаметр канала охлаждения $D1 = 2R_k = 10$ мм, рабочая температура литьевой формы – 60 $^\circ\text{C}$, удельный тепловой поток $q_z \cdot 10^4$ Вт/м², программа выпуска – 1,5 млн. деталей в год. Фактическое время охлаждения составляет 11, а рассчитанное по формулам (2, 3) время – 5,59 с. Расчет времени цикла не учитывает зарастание каналов с течением времени и не отрегулированный процесс охлаждения.

Такие важные свойства литьевых деталей, как прочность, качество поверхности, размерная точность и отсутствие коробления, напрямую зависят от правильно назначенной температуры и грамотно спроектированной системы охлаждения. В самом первом приближении можно сказать, что при повышении температуры стенки формы на 1 $^\circ\text{C}$ время охлаждения увеличивается на 2% (2), что приводит к увеличению времени цикла и снижению производительности.

При переработке пластмасс методом литья под давлением в процессе эксплуатации пресс-форм находящиеся в хладагентах системы охлаждения малорастворимые соединения образуют твёрдые осадки на теплопередающих поверхностях, что приводит к увеличению температуры формы и времени цикла, количеству бракованных деталей и, в конечном итоге, увеличению себестоимости производства пластмассовых изделий.

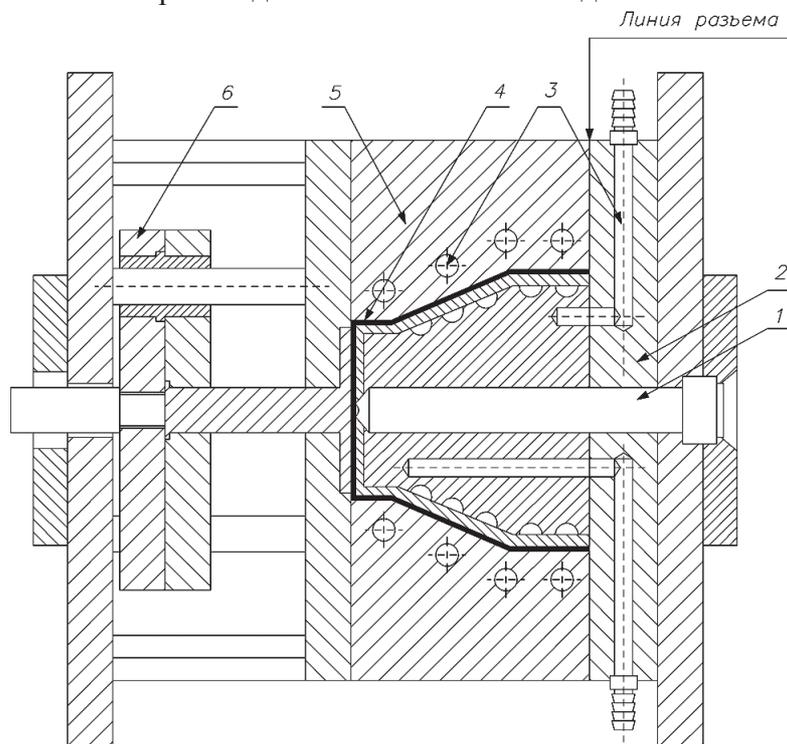


Рисунок 1. Схема горячеканальной литейной формы: 1 – инжектор; 2 – пуансон; 3 – каналы охлаждения; 4 – изделие; 5 – матрица; 6 – система выталкивания

Технические аспекты проблемы охлаждения

в условиях образования отложений на теплопередающих поверхностях

Очень важно поддерживать требуемый режим работы системы охлаждения во время эксплуатации неизменным. Возникает задача: как долго рассчитанная система охлаждения будет работать устойчиво?

Режим работы пресс-формы может быть:

- при крупносерийном производстве: непрерывным по 24 часа в сутки, месяцами;
- при опытном производстве: несколько часов в неделю или в месяц;
- при мелкосерийном производстве: с перерывами на обед, ночь и выходные дни.

Материал деталей пресс-формы, в которых проходят каналы системы охлаждения (плиты, формообразующие детали: пуансоны, матрицы, знаки и вставки): Сталь 45, Сталь 40Х, 4Х5МФС, 40Х13, 95Х18, алюминиевые сплавы типа В95.

Математическая модель

Современные методы расчета системы охлаждения (например программные продукты фирмы Moldflow) позволяют прогнозировать их работу в условиях, приближенных к реальным, при этом учитывают неопределенность исходной информации, например изменение коэффициента теплопередачи по причине загрязнения, старения и коррозии теплопередающих поверхностей каналов охлаждения. Однако, такая неопределенность обычно приводит к завышению теплопередающей поверхности, а следовательно, и уровня проектно-расчетной надежности. В связи с этим любая дополнительная информация о физико-химических явлениях, протекающих на этих поверхностях, позволит уменьшить её запас и разрабатывать эф-

фактивные энергосберегающие технологические схемы, сохраняя требуемый уровень проектно-расчетной надежности [2].

Для интенсификации отвода тепла необходимы высокоэффективные методы уменьшения накипеобразования. При температурном режиме эксплуатации литевых форм, на теплопередающей поверхности каналов охлаждения с хладагентом (водой) ускоряются различные гетерогенные процессы (фазовые превращения, химические и электрические реакции, сорбционных и других процессов). На теплопередающих поверхностях рыхлый или плотный слой осадка твердой фазы.

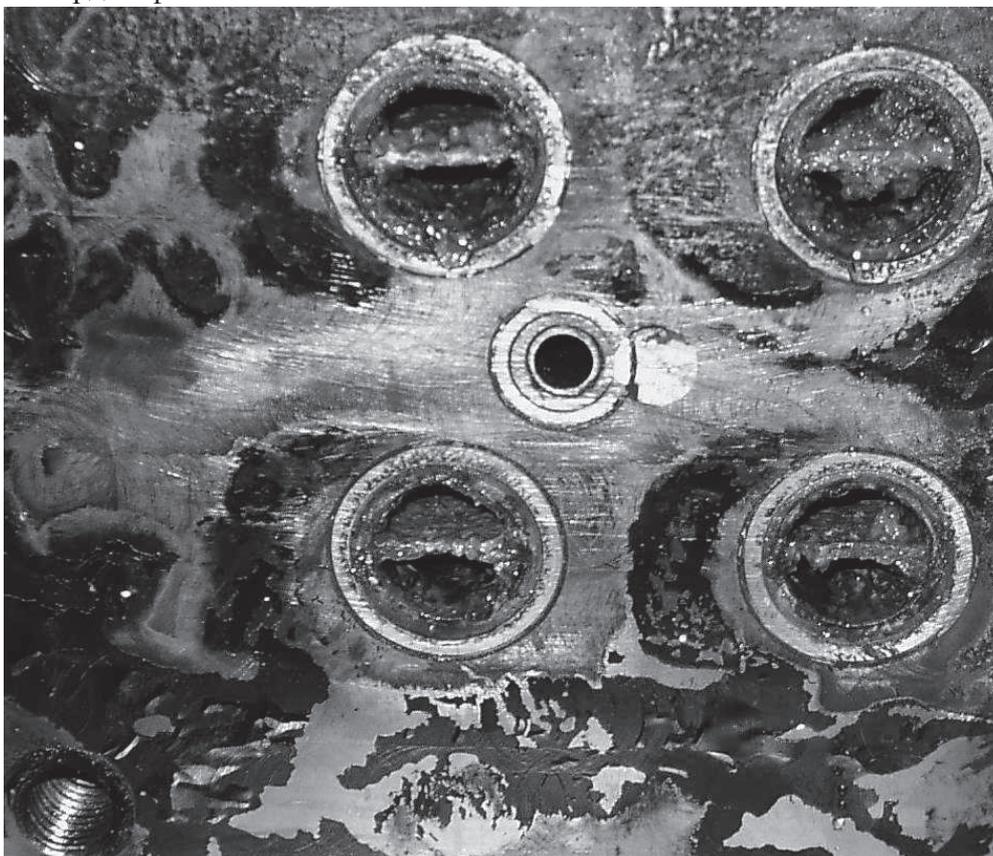


Рисунок 2. Загрязнённые каналы охлаждения

Отсутствие необходимости информации о процессах накипеобразования для получения достоверных количественных оценок при прогнозировании работы системы охлаждения не позволяет осуществлять оперативное управление величины $\tau_{\text{охл}}$, т.е. поддерживать коэффициента теплопередачи не ниже допустимого значения

$$K_T = \frac{1}{\frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_s(\tau)}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha(\tau)}} < [K_T], \quad (7)$$

где λ_w, λ_s – теплопроводность металла формы и слоя накипи (см. рисунок 4),

α – коэффициент теплоотдачи к потоку хладагента.

Созданная нами база данных по эксплуатации литевых форм позволила разработать программный модуль расчета распределения температур (рисунок 4) по толщине плиты матрицы, слоя накипи и в пристенном слое. Задача управления теплопередачей заключается в поддержании значения $[K_T]$ при длительной эксплуатации литевой формы и определении межремонтного пробега T_γ литевой формы. При снижении $K_T < [K_T]$, а соответственно и увеличении $\tau_{\text{охл}}$, становится экономически нецелесообразным осуществлять процесс литья на

данной форме. Скорость изменения суммы термических сопротивлений $\left(\frac{\delta_s(\tau)}{\lambda_s} + \frac{1}{\alpha(\tau)}\right)$ определяемой γ характер изменения $K_T(\delta)$.

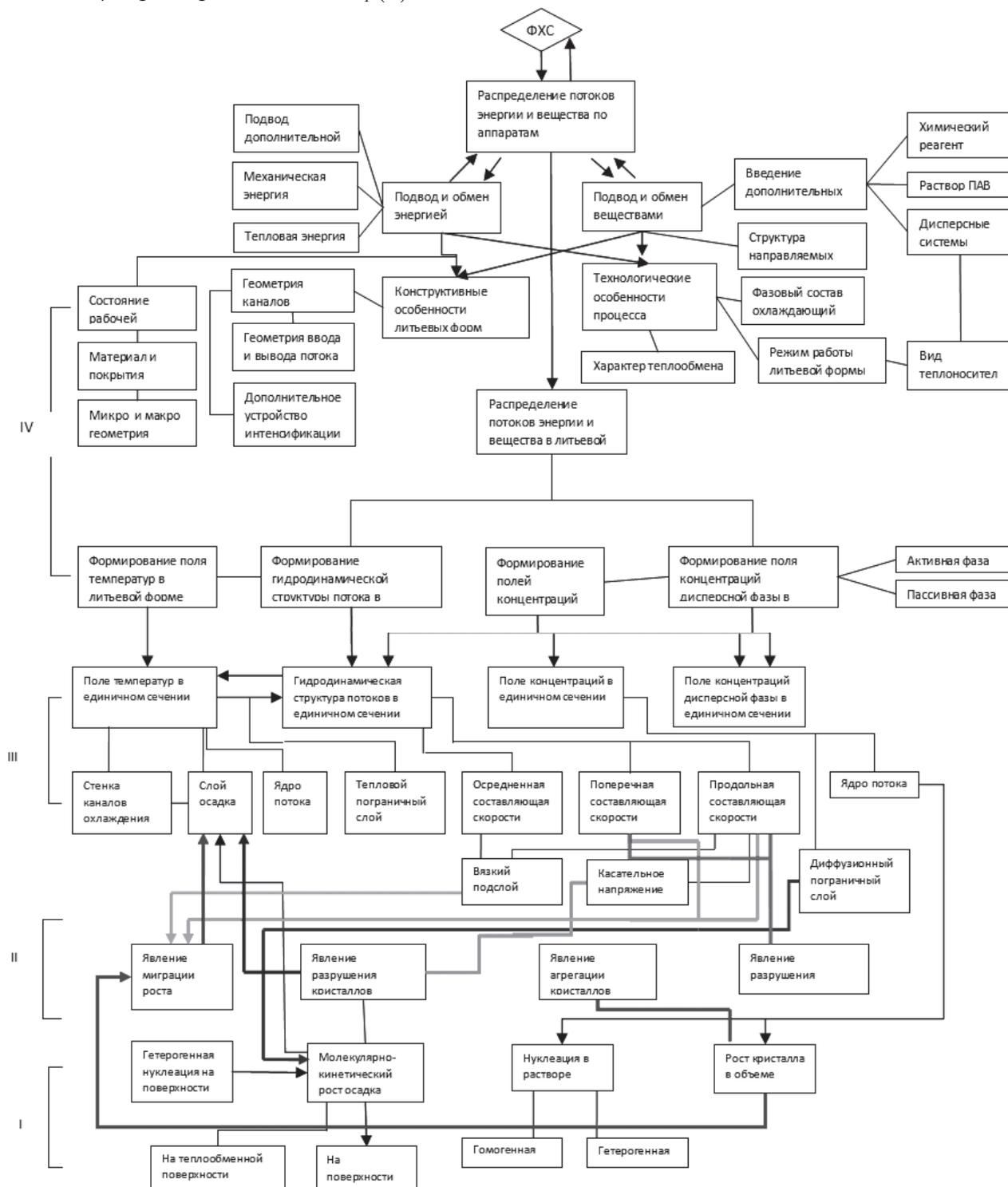


Рисунок 3. Схема функциональной структуры процесса теплопередачи с учетом отложений твердой фазы: I – молекулярно-кинетический уровень; II – агрегативного роста; III – локальной гидродинамики; IV – распределение температур и концентраций по длине канала охлаждения

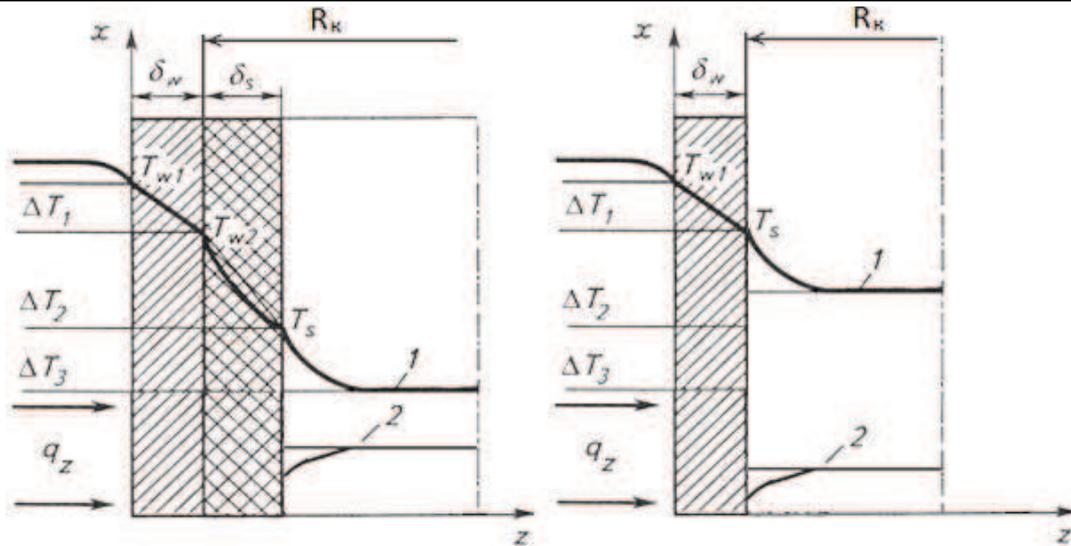


Рисунок 4. Распределение температур по толщине σ_w : плиты матрицы, слоя накипи σ_s , по сечению канала охлаждения (кривая 1); равновесные концентрации солей калия (кривая 2); q_z – удельный тепловой поток от расплава ($Вт/м^2$)

Рассмотрим единичное (локальное) сечение канала, по которому движется двухфазный дисперсный поток раствора в турбулентном режиме. Для построения математической модели используем уравнения, описывающие эффекты и явления на 1, 2, 3, 4 уровнях Физико-химической системы (см. рисунок 3).

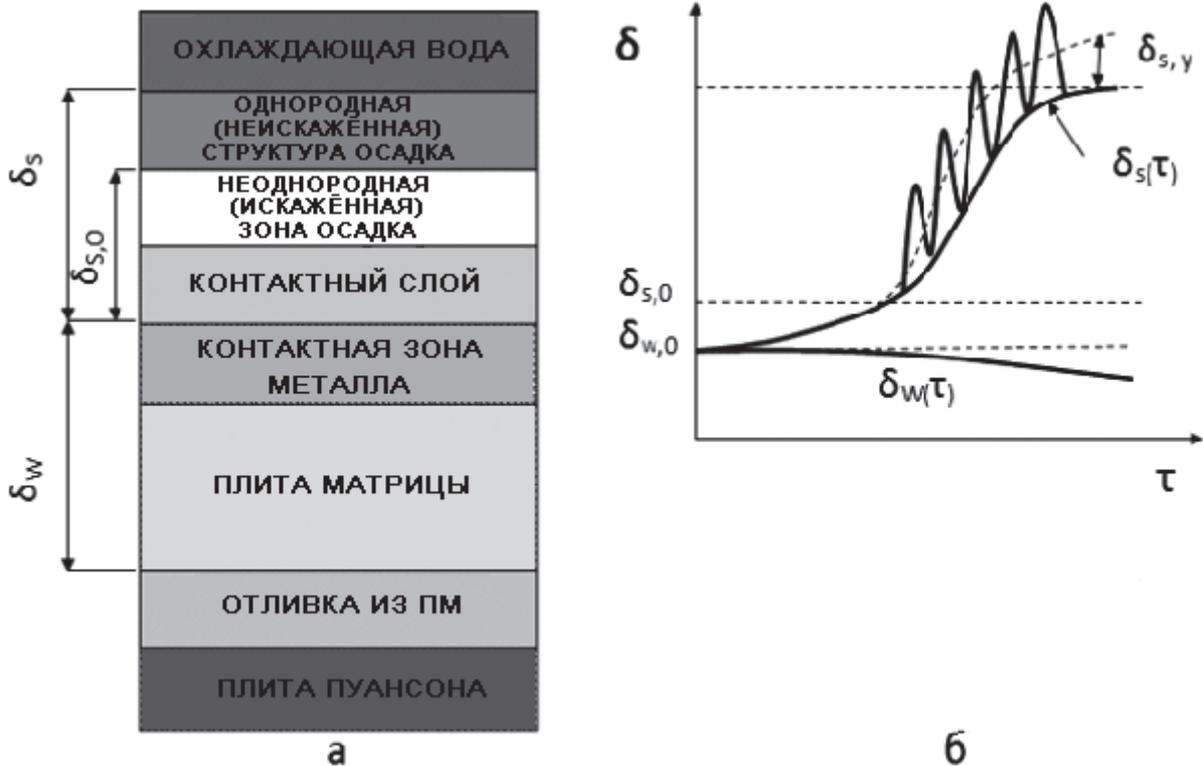


Рисунок 5. а) Схема слоя накипи δ_s ; б) изменение толщины во времени τ ($\delta_{s,y}$ – удаляемый слой накипи)

При взаимодействии теплопередающей металлической поверхности с водой могут протекать процессы коррозии и кристаллизации с образованием продуктов, формирующих контактный слой. Контактная зона осадка формируется в нескомпенсированном электрическом поле на границе раздела теплопередающая поверхность – хладагент и определяет когезион-

ный уровень сцепления частиц накипи и возможность их разрушения (рисунок 5). С течением времени работы литейной формы слой накипи приобретает более однородную структуру. Степень искажения структуры образующегося осадка по мере удаления от поверхности металла исчезает к моменту экранирования влияния геометрической и энергетической неоднородности теплопередающей поверхности первичным слоем осадка.

Основываясь на физической картине процессов, протекающих в системе охлаждения, сформируем задачу для расчета изменения $\delta_s(\tau)$, приводящего к уменьшению температуры $T_\phi(\tau)$. При решении задачи пренебрегли изменением $\delta_w(\tau)$ за счёт коррозионных процессов (линейная скорость коррозии немного меньше линейной скорости роста слоя реакции), а также турбулентно-миграционным переносом взвешенных нерастворимых частиц из ядра потока хладагента на теплопередающую поверхность каналов охлаждения (концентрация нерастворимых взвешенных веществ в системе водоохлаждения не выше 10 мг/л). Изменением концентрации растворённых компонентов в поперечном сечении канала пренебрегаем.

Используя допущение, что скорость перестройки температурного поля в слое осадка намного выше скорости перемещения межфазной границы накипь-раствор, обусловленного ростом осадка накипи, мы рассматривали одномерную задачу Стефана с дополнительными нелинейным граничным условием на движущейся границе [4]. Для локального сечения канала процесс теплопередачи через плиту матрицы и образующейся накипи (рисунок 4) описывается уравнениями Фурье ($q_z \gg q_x$):

для матрицы:

$$\frac{dT_1}{d\tau} = a_1 \frac{d^2 T_1}{dz^2}, \quad (8)$$

для слоя осадка:

$$\frac{dT_2}{d\tau} = a_2 \frac{d^2 T_2}{dz^2}, \quad (9)$$

где a_1, a_2 – соответствующие значения коэффициентов теплопроводности для материала матрицы и слоя накипи, m^2/c .

Начальные условия:

$$\tau = 0, \quad \delta_s = 0, \quad T_1(z) = T_2(z) = T', \quad (10)$$

т.е. в начальный момент времени ($\tau=0$) стенки каналов охлаждения не имеют твёрдых отложений ($\delta_s=0$) и температура стенки канала $T_1(z)$ и равна температуре охлаждающей воды T .

Граничные условия $z=0$:

$$T_1 = T' = \text{const}, \quad (11)$$

$$z = \delta_w: \quad -\lambda_w \frac{dT_1}{dz} = -\lambda_s \frac{dT_2}{dz}, \quad (12)$$

$$z = \delta_w + \delta_s: \quad -\lambda_s \cdot \frac{dT_2}{dz} = \alpha(\tau) [T_\phi(\tau) + T_1]. \quad (13)$$

Закон движения межфазной границы должен удовлетворять кинетическому уравнению роста слоя накипи:

$$\frac{d\delta_s}{d\tau} = k_r s^2, \quad (14)$$

где s – относительная степень пересыщения по растворённому накипеобразующему компоненту:

$$s = \frac{c}{(a_1 - b_1 \cdot T_\phi(\tau))}, \quad (15)$$

где a_1, v_1 и c -const ; k_r -константа скорости роста слоя накипи, м/с:

$$k_r = k_{r,0} \cdot \exp\left[-\frac{E}{R \cdot T_\phi(\tau)}\right], \quad (16)$$

где $k_{r,0}, E, R$ – const.

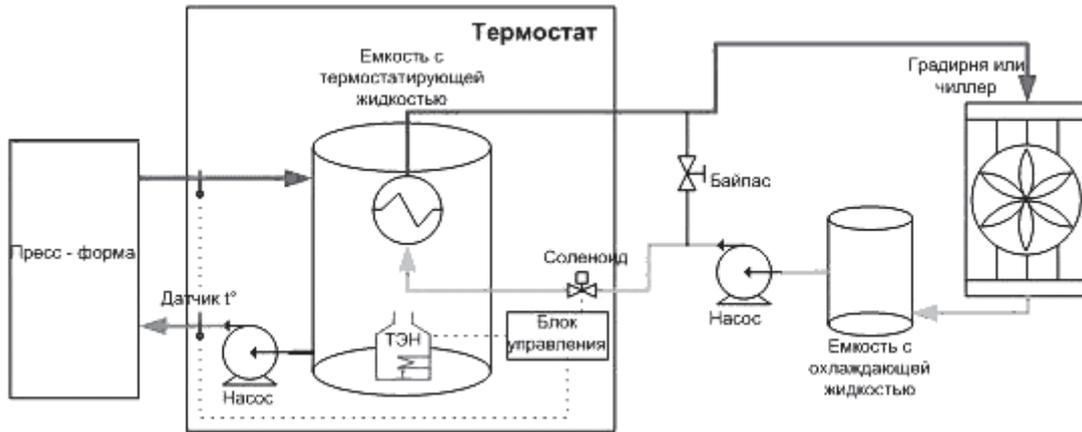


Рисунок 6. Схема термостатируемой литейной формы с датчиками температуры воды на входе и выходе

На рисунке 5 показана схема экспериментальной установки. В состав установки входит два контура по которым циркулирует вода: первый контур – система водооборотного охлаждения цеха и второй контур – система термостатирования. В начале работы осуществляют нагрев пресс-формы до заданной температуры с помощью термостата(работает только первый контур). Во время работы литейной машины температуру охлаждающей воды поддерживают постоянной на входе в каналы охлаждения пресс-формы. В ходе процесса литья измеряли температуру воды во времени на выходе из пресс-формы. Экспериментальные данные по кинетике изменения температуры были использованы при расчете системы охлаждения.

Уточненная методика расчета

Для квазистационарного режима (уравнения 8 – 16) работы системы охлаждения литейной формы составлена система нелинейных алгебраических уравнений, для численного решения которой использовали метод Ньютона-Канторовича. Результаты расчёта приведены в таблице 1. Относительная ошибка в определении температуры формообразующей поверхности T_{w1} не превышала 10%.

Характер изменения времени охлаждения детали показан на рисунке 6.

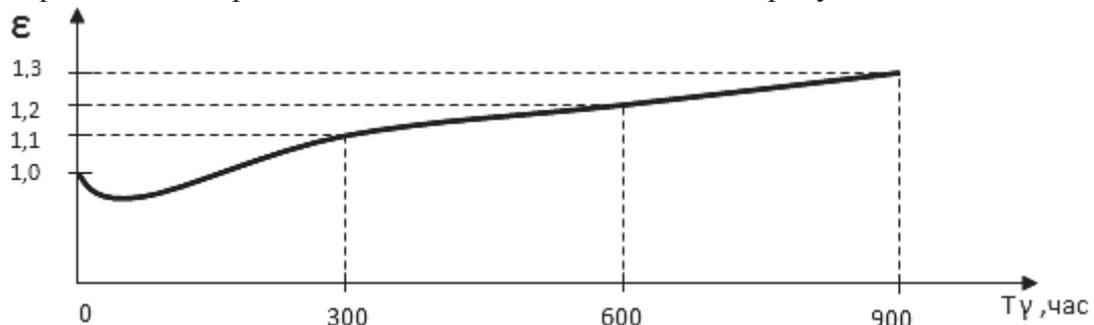


Рисунок 7. Относительное изменение охлаждения в течении времени $T\tau, \epsilon = \tau_{охл} / \tau_{охл0}$

В начальный период эксплуатации формы, уменьшение величины $\tau_{охл}$ можно объяснить образованием на теплопередающей поверхности канала охлаждения первичного слоя накипи, толщиной $\delta_{s,0}$.

На стадии роста первичного слоя образуется островковая структура осадка [4], которая увеличивает шероховатость теплопередающей поверхности.

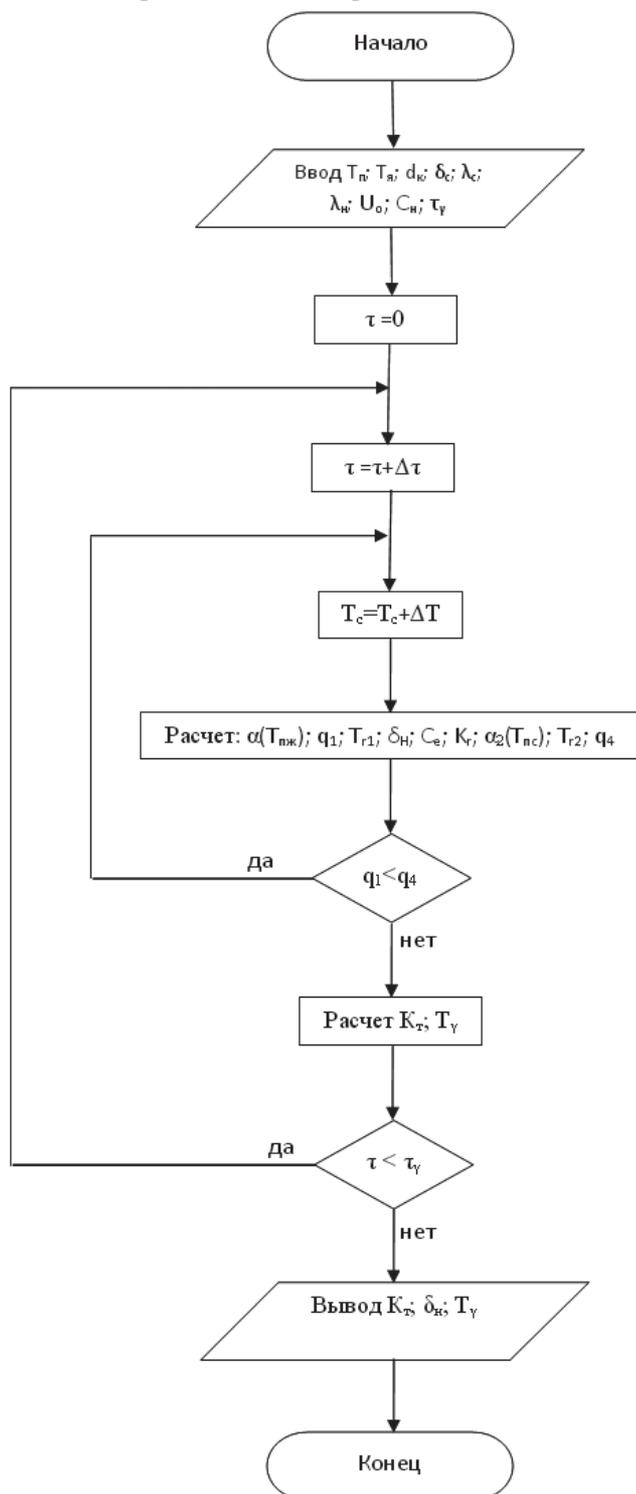


Рисунок 8. Алгоритм разработанной программы

На рисунке 8 приведён алгоритм программы расчёта.

Условные обозначения:

$\tau_{\text{охл}}$ - время охлаждения [ч];

α – среднеинтегральное значение коэффициент температуропроводности литейного материала в условиях переработки [$\text{м}^2/\text{ч}$];

σ – толщина стенки детали; если охлаждение двухстороннее – то половина толщины [м];

t_n – температура расплава, поступающего в форму; t_f – средняя температура на оформляющей поверхности; $t_{ц}$ – температура в середине по толщине стенки изделия к моменту окончания охлаждения (для большинства термопластов 60°);

Q_M – количество теплоты, которое охлаждающий агент должен отнять у расплава полимера, поступившего в пресс-форму;

c_p – средняя теплоёмкость полимера в пределах температур его пребывания в пресс-форме;

C_e – растворимость соли;

z – число отливок в час ($z = 3600/t_{ц}$);

λ_c – теплопроводность металла формы; λ_n – теплопроводность слоя накипи;

q_1, q_4 – тепловые потоки;

K_T – коэффициент теплопередачи;

δ_n – толщина слоя накипи; δ_m – толщина металла.

Таблица 1

Результаты расчета

Время T_y , час	Толщина слоя накипи, м	$\alpha(\tau)$, Вт/м ² К	Температура			Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² К
			T_{w1} , °С	T_{w2} , °С	T_s , °С	
0	0,00012	2670	63,00	59,06	53,79	1089
48	0,00031	2675	63,00	59,06	53,42	1160
96	0,00043	2680	64,00	60,56	55,90	1271
144	0,00055	2640	64,00	60,56	59,94	1017
192	0,00067	2592	64,00	60,56	59,05	954
240	0,00076	2584	65,00	62,08	60,89	915
288	0,00086	2567	65,00	62,08	60,59	872
336	0,00096	2540	65,00	62,08	59,28	833
384	0,00106	2510	65,00	62,08	57,95	796
432	0,00116	2400	65,00	62,08	56,61	763
480	0,00123	2390	66,00	63,64	60,33	745
528	0,00131	2380	66,00	63,64	59,52	722
576	0,00138	2364	66,00	63,64	58,70	701
624	0,00146	2345	66,00	63,64	57,88	681
672	0,00154	2337	66,00	63,64	57,05	662
720	0,00161	2327	66,00	63,64	56,21	644
768	0,00169	2315	66,00	63,64	55,37	626
816	0,00177	2310	66,00	63,64	54,52	610
864	0,00185	2301	66,00	63,64	53,67	594
902	0,00193	2291	66,00	63,64	52,81	579
960	0,00198	2280	67,00	65,26	59,43	573
1008	0,00204	2250	67,00	65,26	59,01	564
1056	0,00209	2240	67,00	65,26	58,60	555
1104	0,00214	2170	67,00	65,26	58,18	546
1152	0,00219	2130	67,00	65,26	57,34	537
1200	0,00225	2101	67,00	65,26	57,78	529
1248	0,00230	2050	67,00	65,26	56,91	521
1296	0,00235	2014	67,00	65,26	56,49	513
1344	0,00241	1980	67,00	65,26	56,08	505
1392	0,00246	1961	67,00	65,26	56,63	498
1440	0,00246	1942	67,00	65,26	56,62	498

Вследствие турбулизации, теплообмен в пристенном слое интенсифицируется и коэффициент $\alpha(\tau)$ возрастает на (10 – 15)%. На этой стадии улучшается теплоотвод и время $\tau_{\text{охл}}$ уменьшается на 15 – 20% по сравнению с $\tau_{\text{охл},0}$ для чистой теплопередающей поверхности.

Но уже через 300 часов эксплуатации формы, как видно из графика на рисунке 3, время охлаждения возросло на 10%, по сравнению со временем охлаждения на старте, а через 600 часов – на 20%, приводя к необходимости чистить каналы.

Таким образом, использование вычислительных методов позволяет более глубоко рассмотреть сущность процессов охлаждения в литейной форме с учетом накипеобразования, а также проводить проектные расчеты различных типов систем охлаждения.

Литература

1. 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.
2. Грис Х. Коррозия в денежном выражении // Kunststoffe-Пластмассы, октябрь, 2010, 13-16с.
3. Булатов М.А., Дувидзон В.Г. Надежность систем охлаждения литейных форм // Форма + оснастка для переработки полимерных материалов, октябрь, 2008, 16-18 с.
4. Генель Л.С., Галкин М.Л., Корнеева Т.М., Брагинский В.А. Ингибиторы коррозии и отложения солей для системы охлаждения литейных форм // Форма + оснастка для переработки полимерных материалов, ноябрь, 2007, 30-34 с.
5. Веселов А.В. Тепловой расчет литейного оборудования для переработки полимерных материалов. Уч. пособие. –М.: МИХМ, 1979, -56 с.
6. Булатов М.А. Комплексная переработка много компонентных жидких систем теория и техника управления оборудованием осадков. -М.: Мир, 2004.-302 с.
7. Барвинский И.А., Барвинская И.Е. Руководство по анализу охлаждения пресс-форм. М., 2000.
8. Богорош А.Т. Возможности управления свойствами кристаллических отложений и их прогнозирование. Киев: Высшая школа, 1987.

Применение тонких клиентов для оперативного планирования технологического процесса

Васильев А.А., к.т.н. доц. Зубов Д.В., к.т.н. Крысанов К.С.
Университет машиностроения
zubov@msuie.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения тонких клиентов для планирования оперативной деятельности технологических процессов.

Ключевые слова: SCADA-система, тонкие клиенты, анализ данных, оперативное планирование

В настоящее время одним из самых востребованных направлений развития систем оперативного управления технологическими производствами на SCADA и MES уровня является внедрение функций foresight – постоянно уточняющегося прогноза технологических величин на масштабе времени порядка смены оператора или производственного цикла.

Одним из потенциальных потребителей такой технологии являются периодические биотехнологические процессы, отличающиеся большой вариативностью протекания стадий биосинтеза (вследствии вырождения культуры, присутствия контаминантов и т.д.). В результате ряда факторов может существенно отличаться длительность процесса биосинтеза и как следствие, количества потребляемых ресурсов – электричества, охлаждающей воды,