

ПЕРЕНОС ТЕПЛА И КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАПЕЛЬ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ РАСПЛАВОВ АЗОСОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ С НАПОЛНИТЕЛЯМИ В ГРАНУЛЯЦИОННЫХ БАШНЯХ

**Таран Александр Леонидович, Таран Алла Валентиновна, Долгалёв Евгений
Витальевич**

*Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова, 119571 г.
Москва, пр. Вернадского, д. 86, Россия*

По сравнению с аммиачной селитрой известково-аммиачная селитра (минеральное удобрение с пониженным содержанием (менее 28% масс.) азота) более безопасна с технологической и экологической точек зрения и не попадает под ограничения стран ЕС на транспортировку, хранение и применение [1-3]. Целесообразно организовать производство известково-аммиачной селитры на существующих агрегатах получения аммиачной селитры при их минимальной реконструкции. Технология производства известково-аммиачной селитры в башне заключается в смешении расплава аммиачной селитры с порошком доломита (мела, известняка), в диспергировании полученной суспензии в восходящем потоке воздуха в башне и охлаждении полученных гранул в выносном или встроенном псевдооживленном слое [1-3].

В работе дано математическое описание, адекватное ходу реального процесса гранулирования кристаллизацией капель суспензии известково-аммиачной селитры в башнях [4, 5].

В описываемом случае полагали гранулу сферической, усадочную полость сферической и расположенной в центре гранулы, коэффициент теплоотдачи неизменным по поверхности гранулы, «внешнюю» усадку отсутствующей, падение гранул «нестесненным», конвекцию жидкой фазы в кристаллизуемой грануле отсутствующей, циклическое изменение температуры охлаждающей среды вокруг гранулы в псевдооживленном слое аппроксимировали линейной зависимостью:

$$\frac{\partial}{\partial r_i} \left[\lambda_j(t) \frac{\partial t(r_i, \tau)}{\partial r_i} \right] + \frac{2\lambda_j(t)}{r_i} \frac{\partial t(r_i, \tau)}{\partial r_i} - c_i(t) \rho_i(t) \frac{\partial t(r_i, \tau)}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

Начальные условия:

$$t(r_i, 0) = t_{\text{жн}} = \text{const}; \quad 0 \leq r_i \leq R_i; \quad r_{\xi_i, i}(0) \cong R_i + 0; \quad r_{\Pi_j, i} = 0; \quad \alpha_{c, i} = f_1(\omega_H R_i) \\ 2\pi \rho_c c_c \int_0^{R_B} \omega_c(r_B) t_{\text{ск}}(r_B) r_B dr_B = G_c c_c t_{\text{сн}} + Q; \quad Q = 2\pi \int_0^H \int_0^{R_B} q(r_B, h) dr_B dh \quad (2)$$

Условия начала фазового превращения:

$$4\pi \int_{\tau_{j, i}}^{\tau_{\text{инд}, i}} \int_{r_{j, i}}^{R_j} \omega_{3, j} [t(r_i, \tau)] r_i^2 dr_i d\tau = 1; \quad t(r_{j, i}, \tau_{j, i}) = t_{\phi, j} \quad (3)$$

Условия на границе усадочной полости:

$$\frac{\partial t(r_{\Pi_j, i}, \tau)}{\partial r_i} = 0; \quad r_{\Pi_j, i} = \left\{ [R_i^3 - r_{\xi}^3(\tau)] (\rho_{\kappa 1} / \rho_{\text{жс}} - 1) \right\}^{1/3}; \quad R_{\Pi_j, i} = R_i \left(\frac{\rho_{\kappa 1} - \rho_{\text{жс}}}{\rho_{\kappa 1}} \right)^{1/3} \quad (4)$$

условия на границах фазового и полиморфных превращений

$$t_j(r_{\xi_j, i}, \tau) = t_{j+1}(r_{\xi_j, i}, \tau) < t_{\phi, j} \quad (5)$$

$$\lambda_{j+1}(t) \frac{\partial t_j(r_{\xi_j, i}, \tau)}{\partial r_i} - \lambda_j(t) \frac{\partial t_j(r_{\xi_j, i}, \tau)}{\partial r_i} = L_{j+1} \rho_{j+1} v_{\text{л}j} \quad (6)$$

$$v_{ji} = \begin{cases} 0, r_{\xi j, i} = R_i + 0, \tau < \tau_{\text{инд}, i} \\ f_j(\Delta t_j) = f_j(t_{\phi j} - t(r_{\xi j, i}, \tau)), r_{\xi j, i}(\tau) < R_i, \tau \geq \tau_{\text{инд}, i} \end{cases} \quad (7)$$

где $L_{к1} = L_{кр}(1 - a)$; $L_{кр}$ - скрытая теплота кристаллизации NH_4NO_3 ; a - массовая доля наполнителя (мела, известняка, доломита).

Условия устойчивости фазовой границы:

$$-\lambda_i(t) \frac{\partial t(r_{\xi j, i}, \tau)}{\partial r_i} \leq \lambda_{ж}(t) \frac{\partial t(r_{\xi j, i}, \tau)}{\partial r_i} \quad (8)$$

где c – постоянная для конкретных условий и веществ величины [6, 7].

Условие предотвращения появления новых центров фазового превращения в метастабильной фазе перед межфазной границей:

$$4\pi \int_0^{\tau_{\text{ож}} r_{\xi j, i}} \int_{r_{j, i}} \omega_{3, j} [t(r_i, \tau)]_i^2 dr_i d\tau < 1; \quad t(r_{j, i}, \tau_{j, i}) = t_{\phi, j}; \quad \tau_{\text{ож}} = \int_{r_{j, i}}^{r_{\xi j, i}} \frac{dr_i}{v_{ji}} \quad (9)$$

условие на внешней границе капли фракции:

$$\alpha_{c, i} [t(R_i, \tau) - t_c(r_B, \tau)] = -\lambda_j \frac{\partial t(R_i, \tau)}{\partial r_i} \quad (10)$$

Баланс тепла между кристаллизующимися гранулами и хладогентом на элементарных участках радиуса и высоты башни, взятой по аппарату в целом, имеет вид:

$$\begin{aligned} \int_0^{\tau_k(R_i, r_B)} \int_0^{R_B} \int_0^\infty 3 \frac{2\pi}{R_i \rho_{ж}} \alpha_{c, i} [t(R_i, \tau) - t(r_B, \tau)] f_B G_{ж}(r_B) \xi_p(R_i, r_B) dR_i dr_B d\tau = \\ \int_0^H \int_0^{R_B} \int_0^\infty 3 \frac{2\pi}{R_i \rho_{ж}} \alpha_{c, i} [t(R_i, \tau) - t(r_B, \tau)] f_B G_{ж}(r_B) \xi_p(R_i, r_B) dR_i dr_B \frac{dh}{\omega(R_i, r_B, \tau)} = \\ = \int_0^H \int_0^{R_B} 2\pi \cdot r_B q(r_B, h) dr_B dh = Q = - \int_{t_{ск}}^{t_{сн}} \int_0^{R_B} 2\pi \cdot r_B G_c(r_B) c_c dr_B dt_c; \quad G_c(r_B) = \omega_c(r_B) \rho_c \end{aligned} \quad (11)$$

Локальная температура воздуха в башне $t_c(r_B, \tau)$ зависит от поля его скоростей $\omega_c(r_B)$, взаимодействия сплошной и переносной фаз, теплообмена в «факеле» и межфакельном пространстве. Для расчета этих явлений записывают уравнения переноса количества движения и тепла в сплошной фазе (воздухе) с учетом механического и теплового воздействия на перенос в сплошной среде струй «факела» дисперсной фазы. Соответствующая модель впервые предложена в ГИАПе [8-11] и далее использована при описании процесса гранулирования расплавов в башнях в целом [3, 5, 12, 13].

В виду громоздкости этого фрагмента математического описания и ограниченного его влияния на ход процесса кристаллизации гранул, он приведен здесь в виде функциональной зависимости:

$$\begin{aligned} t_c(r_B, \tau) = f_2[\omega_c(R_i, r_B, \tau), G_{ж}(r_B), \xi_p(R_i, r_B) dR_i, \omega_n, \omega(R_i, \tau) \dots] \\ \omega_c(R_i, r_B, \tau) = f_3[R_i, r_B, \tau, G_{ж}(r_B), \omega_n, \omega(R_i, \tau) \dots] \end{aligned} \quad (12)$$

в случае, если фракционный состав в «факеле» падающих гранул неизменен по радиусу башни $\xi_p(R_i, r_B) \neq f(r_B)$ и воздух в её радиальном сечении идеально перемешан $t_c(h) \neq f(r_B)$, то уравнение (13) переходит в выражение, полученное нами ранее и используемое в [3-5, 14-19], а зависимости (12) с вышеописанным фрагментом оказываются не востребованными:

$$\int_0^H \int_0^{R_i} \frac{1}{R_i} \alpha_{c, i} [t(R_i, \tau) - t_c(\tau)] \xi_p(R_i) dR_i \frac{1}{\omega_{сн}(R_i, \tau)} dh = -\frac{1}{3} G_{сн} \rho_{ж} \int_{t_{ск}}^{t_{сн}} dt_c \quad (13)$$

Это упрощает математическое описание процесса и делает его пригодным для инженерных расчетов.

Скорость зарождения и роста кристаллической фазы и полиморфных превращений в известково-аммиачной селитре нами определены экспериментально. Эти данные и методики из определения изложены в [3, 25]. Данной работе предшествовала разработка конструкции и методики расчета диспергатора суспензии известково-аммиачной селитры, а так же его успешная промышленная апробация на ОАО «Невинномысский Азот» [3, 26].

Воздух из охладителя гранул часто попадает в грануляционную башню, в нижней части которой он смешивается с подсасываемым атмосферным воздухом. Вверху башни весь поток очищается и выбрасывается в атмосферу. В этом случае сеточные значения, соответствующие температурам воздуха, подаваемого из охладителя $T_{\text{ск}}^{s+1}$ в башню и выбрасываемого из башни на пылеочистку $T_{\text{с,мб},0}^{s+1}$, энтальпии гранул внизу башни $I_{j,i,N}^{s+1}$ попадающих в охладитель, и на выходе из охладителя $I_i(t_{\text{ск}})$, определяются в результате итерационного сопряженного расчета тепловых процессов в башне и охладителе. Если воздух из охладителя очищается отдельно и сбрасывается в атмосферу, то итерационные процедуры расчета процессов в башне и охладителе независимы.

Интегральные уравнения (2), (9), (13) решали заменой интегрирования на операторы суммирования с синхронизацией их с пространственно-временной сеткой расчета процесса в гранулах и башне. Краевые условия (4), (6), (10) аппроксимировали обычным образом [3-5, 28÷31]. Полидисперсную смесь, функцию распределения которой по размерам получали решением по разработанной нами методике расчета диспергаторов [3, 26], разбивали на 6 фракций. Аналогичным образом поступали с плотностью орошения сечения башни суспензией. Расчет процесса теплообмена между полидисперсной смесью гранул и воздухом в башне проводили, разбивая объем башни на 10 участков по радиусу $R_{\text{б}}$ и 20 участков по её высоте H . При этом дифференциальные операторы по H , $R_{\text{б}}$, $t_{\text{с}}$ заменяли в уравнении (11) разностными. Аналогичным образом поступали, анализируя процессы превращения при циклически изменяющейся температуре охлаждающей среды в псевдоожоженном слое.

Адекватность предложенного математического описания ходу реального процесса планировали оценить путем сравнения результатов расчетов процесса кристаллизации капель суспензии известково-аммиачной селитры с экспериментальными данными скоростного термического анализа (СТС) [20, 21, 32], наблюдением за процессом при осаждении капель суспензии известково-аммиачной селитры в жидком хладагенте (гексане), «витанием» капли суспензии в пленочном режиме кипения на паровой «подушке» фреона-II. Результаты расчета также сравнили с данными, полученными на промышленной грануляционной башне.

Влияние добавок на снижение скорости зарождения центров превращения и увеличение $\tau_{\text{инд}}$ превращения III↔IV в NH_4NO_3 при температурных циклах нагрев↔охлаждение при перемешивании гранул по высоте псевдоожоженного слоя охладителей. Такие добавки были найдены и предложены [5, 14]. Однако добавка в NH_4NO_3 (мела, известняка, доломита), как показали полученные нами кинетические параметры превращения III↔IV [3, 11], не уменьшает этот показатель известково-аммиачной селитры по сравнению с выпускаемой NH_4NO_3 , что согласуется с экспериментальными данными.

Анализ термограмм СТА и размеров усадочной полости показал, что при кристаллизации капель суспензии известково-аммиачной селитры наиболее вероятен последовательный тип [3, 5, 15] превращения. Отмечено удовлетворительное согласование расчета по уравнениям (1)-(40) [4] и эксперимента СТА во всех рассмотренных случаях (в том числе приведенных в табл. 1).

Сравнением результатов расчетов между собой и с экспериментальными данными (СТА и эксплуатации промышленных грануляционных башен) для аммиачной [3, 5] и известково-аммиачной селитр оценена погрешность игнорирования в расчетах ряда факторов

(упрощения математического описания) (см. табл. 2) . Установлено, что предлагаемая математическая модель – система уравнений (1)-(13) [4] адекватно описывает процесс гранулирования кристаллизацией капель расплавов и суспензий в башнях. Игнорирование движения жидкой фазы к межфазной границе в кристаллизуемой капле за счет разности плотностей фаз и образования за счет этого усадочной полости в центре гранулы дает малую погрешность расчетов, ибо переносимый к межфазной границе с жидкой фазой конвективный поток тепла не велик. Недопустимо игнорирование в расчетах динамики образования усадочной полости, что подтверждается визуальным фиксированием наличия усадочных полостей в гранулах (см. табл. 2). Совершенно не допустим расчет процесса гранулирования капель расплавов и суспензий в башнях по формулам «внешней» задачи [29,30] (см. табл. 2 [5]).

В заключение заметим, что создано математическое описание для всеохватывающего расчета процесса гранулирования кристаллизацией капель суспензий в башнях адекватное ходу реально процесса.

Условные обозначения:

f_{1-6}, f_j, f - функциональные зависимости;

$i = 1, 2, \dots, I$ - номер фракции [шт];

$j = ж, к1, к2, \dots$ - вид фазы;

$x = 1, 2, \dots, X$ - число шагов по пространственной координате, [шт];

$n = 1, 2, \dots, N$ - число шагов по временной координате, [шт];

M - число шагов по величине геометрических характеристик башни (радиус, высота), [шт];

m - номер шагов по величине геометрических характеристик башни (радиус, высота);

Q - тепловой поток от кристаллизующихся в башне гранул, [Вт];

q - удельный тепловой поток от кристаллизующихся в башне гранул, [Вт/м²];

L - скрытая теплота превращения j фазы, [дж/кг];

I_i - энтальпия гранул i фракции в продукте, [дж/кг];

H - высота башни, [м];

h - шаг по высоте башни, [м];

c - теплоемкость фазы [дж/кг·град];

R - полный радиус объекта (башни, гранулы, усадочной полости и т.д.), [м];

r - текущий радиус объекта, [м];

t - температура, [°C];

T - значение сеточной функции температуры, [°C];

s - номер итерации;

$S_{ск}$ - площадь сечения рабочей зоны охладителя с кипящим слоем [м²];

$G_c, G_{ж}, G_{кc}, G$ - полные на весь аппарат (башню или кипящий слой (кc)) расходы воздуха, расплава, гранул в аппарате кc и удельный на единицу массового расхода расплава
кг/с возд.

(суспензии) расход хладагента, [кг/с], [$\frac{кг/с \text{ расплава}}{кг/с \text{ возд.}}$];

$G_c(r_B), G_{ж}(r_B)$ - переменные по радиусу башни расходы воздуха и жидкой фазы (расплава, суспензии) [кг/с];

$v_{лj}$ - линейная скорость роста центров превращения j фазы [м/с];

$\omega, \omega_c, \omega_{ст}, \omega_n$ - скорости воздуха относительно гранул, на пустой аппарат, относительно стенок башни, вылета из отверстий диспергатора [м/с];

$\omega_{з,j}$ - скорость зарождения центров превращения j фазы [м³]-1;

$\xi_p(R_i, r_B)dR_i$ - доля массового расхода i -фракции в зависимости от радиуса башни;

α - коэффициент теплоотдачи от поверхности гранулы к воздуху в башне или охладителе, [Вт/(м²·град)];

ρ_j - плотность j фазы, кг/м³;

ε - порозность в башне;

λ_j - коэффициент теплопроводности j фазы, [Вт/(м·град)];

Δ - разностный оператор первой производной (разностный аналог оператора Гамильтона);

Δ^2 - разностный оператор второй производной (разностный аналог оператора Лапласа);

Δ - оператор приращения параметра;

\sum - оператор суммирования;

τ - время, [с];

Индексы:

Б - башня;

ж - расплав (жидкая фаза, суспензия);

к1, к2 - кристаллическая фаза соответствующей модификации;

н - начальный;

к - конечный;

з - зарождение;

л - линейный;

П - усадочная полость (пора);

инд - индукционный период;

с - охлаждающая среда (воздух);

кс - кипящий слой;

Р - распределение;

Φ_j - равновесное значение параметра (температуры) для j фазы;

ст - стенка башни;

ξ - положение фазовой границы.

Библиография.

1. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности. – Под ред. В.М. Олевского, М.: Химия, 1990.-285с.
2. Таран А.Л., Долгалёв Е.В., Таран Ю.А. Получение известково-аммиачной селитры в грануляционных башнях производства аммиачной селитры.//Химическая техника, 2006, №1, стр. 28-31.
3. Долгалев Е.В. Технология и аппаратурное оформление производства известково-аммиачной селитры в грануляционных башнях. Дисс. канд. техн. наук, М.: МИТХТ, 2006.
4. Таран А.Л. Исследование процессов кристаллизации однокомпонентных расплавов методом электроаналогии. Дисс. канд. техн. наук, М.: МИТХТ, 1976.
5. Таран А.Л. Теория и практика процессов гранулирования расплавов и порошков. Дисс. докт. техн. наук, М.: МИТХТ, 2001.
6. Соболев В.В. Условия формирования дендритной структуры при затвердевании расплавов.//Известия АН СССР, Металлы, 1987, №3, с. 76-83.
7. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка.//М.: Металлургия, 1987, 224с.
8. Иванов М.Е., Иванов А.Б. Решение задач об общем случае двухмерного движения гранул (тел) в поле тяжести.//Инженерно-физический журнал, 1975, т. 28, №1, с. 119-123.
9. Иванов М.Е. Рассеяние гранул и спутное течение сплошной среды при их движении от одиночного источника.//Теор. основы хим. технол., 1983, т. 17, №4, с. 551-554.
10. Иванов М.Е. Теория процессов обмена в двухфазной системе при башенном гранулировании.//Теор. основы хим. технол., 1983, т. 17, №6, с. 776-783.
11. Иванов М.Е., Малкин Б.И. Численное решение задачи определения механики и теплообмена при башенном гранулировании.//Сб. «Производство азотных удобрений», Труды ГИАП, М.: ГИАП, 1985, с. 99-107.
12. Олевский В.М., Гельперин Н.И., Иванов М.Е., Цеханская Ю.В., Таран А.Л. Пути повышения качества аммиачной селитры.//Хим. пром., 1987, №11, с. 676-682.
13. Таран А.Л., Шмелёв С.Л., Олевский В.М., Кузнецова В.В., Рустамбеков М.К., Филонов А.М., Таран А.В. Исследование возможности гранулирования в башнях аммиачной селитры с добавками сульфата аммония.//Хим. пром., 1991, №12, с. 743-749.
14. Казакова Е.А., Таран А.Л., Таран А.В. Экспериментальное и теоретическое исследование кристаллизации карбамида в условиях башенного гранулирования.//Теор. основы хим. технол., 1983, т. 17, №5, с. 713-714.
15. Таран А.Л., Кабанов Ю.М. Затвердевание гранул азотсодержащих удобрений при неравномерной по их поверхности интенсивности отвода тепла.//Теор. основы хим. технол., 1983, т. 17, №6, с. 759-766.
16. Таран А.Л., Таран А.В. Гранулирование однокомпонентных расплавов диспергированием в восходящий поток хладагента.//Инженерно-физический журнал, 1986, т. 51, №1, с. 60-68.
17. Таран А.Л., Таран А.В. Оценка погрешностей методов расчета процессов кристаллизации однокомпонентных расплавов в башнях.//Хим. пром., 1985, №9, с. 561-565.
18. Таран А.Л., Таран А.В., Кабанов Ю.М. Гранулирование азотных удобрений в башнях.//Теор. основы хим. технол., 1984, т. 28, №1, с. 13-19.
19. Гельперин Н.И., Таран А.Л., Таран А.В. Кристаллизация и гранулирование расплавов при их диспергировании в жидких хладагентах.//Теор. основы хим. технол., 1989, т. 23, №2, с. 182-187.
20. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение в аппаратах с кипящим слоем.//М.: Химия, 1973, 75 с.
21. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений.//М.: Химия, 1980, 289 с.

22. Иванов М.Е., Иванов А.Б., Лидин В.М. Расчет падения гранул, выбрасываемых под углом в вертикальном восходящем воздушном потоке с плоским профилем скоростей.//Теор. основы хим. технол., 1969, т. 3, №5, с. 800-803.
23. Коваленко В.С. К расчету скорости свободного осаждения капель в жидкости.// Теор. основы хим. технол., 1978, т. 12, №3, с. 464-466.
24. Rowe P.N., Claxton K.F., Lewis I.B. Heat mass transfer from a single sphere in an expensive flowing fluid.//Trans. Instn. chem. engrs., 1965, v. 43, №1, p. 14-31.
25. Таран А.Л., Рустамбеков М.К., Таран Ю.А., Долгалев Е.В. Исследование скоростей зарождения и роста кристаллов в расплавах известково-аммиачной селитры (CAN) и полиморфных превращений I рода в её кристаллической фазе.//Химическая технология, 2005, №10, с. 40-47.
26. Патент РФ. Заявка №2004126744 от 6 сент. 2004 г. Положительное решение от 06 дек. 2005 г. Гранулятор // Рустамбеков М.К., Таран А.Л., Трошкин О.А., Долгалев Е.В., Сундиев С.А., Поплавский В.Ю., Бубенцов В.Ю.
27. Гельперин Н.И., Лапшенков Г.И., Таран А.Л., Таран А.В. Исследование процессов с изменением агрегатного состояния вещества методом электроанalogии.//Теор. основы хим. технол., 1975, т. 9, №3, с. 380-386.
28. Таран А.В. Исследование процесса кристаллизации индивидуальных веществ с переохлаждением.//Дисс....канд. техн. наук., М.: МИТХТ, 1979.
29. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы.//М.: Наука. 1983, 616 с.
30. Самарский А.А. Теория разностных схем.//М.: Наука, 1983, 616 с.
31. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности.//М.: Наука, 1975, 227 с.
32. Казакова Е.А., Таран А.Л., Таран А.В. Методы экспериментального и теоретического анализа процесса кристаллизации и охлаждения гранул в потоке хладоагента.//Теор. основы хим. технол., 1984, т. 18, №1, с. 13-19.

Результаты расчета и эксперимента кристаллизации капель суспензии известково-аммиачной селитры ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + 20\%$ конверсионного мела) методом скоростного термического анализа.

Исходные данные						Время полной кристаллизации $\tau_{\text{пк}}, \text{с}$	
Диаметр гранул $d, \text{мм}$	Содержание влаги $\varphi, \%$	Скорость воздуха относительно гранулы, $\omega_c, \text{м/с}$	Температура воздуха, $t_c, \text{°C}$	Температура расплава, $t_{\text{жн}}, \text{°C}$	Температура кристаллизации, $t_{\text{кр}}, \text{°C}$	Результаты расчета	Данные СТА
2,0	0,3	6,0	40	173	156	1,8	1,75
2,2	0,12	4,8	40	176	158	2,55	2,5
2,3	0,12	0	75	176	158	5,2	5,0
2,5	0,3	6,0	40	176	156	2,75	2,7
2,5	0,3	5,5	40	180	158	3,2	3,0
2,7	0,3	5,0	40	176	156	3,0	2,9

Результаты расчетов и по предложенным математическим описаниям с учетом и без учета отдельных факторов и соответствующие им экспериментальные данные (известково-аммиачной селитра: $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 20\%$ конверсионного мела).

Тип расчета	Время, с (числитель) Высота, м (знаменатель)			Время, с (числитель – эксперимент СТА; знаменатель – расчет)	\bar{t} °С (числитель – эксперимент на промышленных башнях; знаменатель – расчет)
	Аммиачная селитра, $t_{\text{жсн}} = 180^\circ\text{C}$, $t_{\text{сн}} = 30^\circ\text{C}$, $G = 14$ (кг/ч хл.)/(кг/ч пр.), $\omega_{\text{н}} = 4$ м/с, $\omega_{\text{с}} = 2$ м/с			Аммиачная селитра, $t_{\text{жсн}} = 180^\circ\text{C}$, $t_{\text{сн}} = 80^\circ\text{C}$, $\omega_{\text{с}} = 0$ м/с	Аммиачная селитра, $t_{\text{жсн}} = 180^\circ\text{C}$, $t_{\text{сн}} = 18^\circ\text{C}$, $G = 10$ (кг/ч хл.)/(кг/ч пр.),
1	2	3	4	5	6
Радиус капли, мм.	0.5	1.0	1.5	1.15	-
1. решение по системе уравнений (1)- (24)	$\frac{0.8}{3.1}$	$\frac{2.3}{15.0}$	$\frac{4.0}{35.0}$	$\frac{6.0}{6.2}$	$\frac{104}{108}$
2. Расчет с учетом движения расплава к межфазной границе	$\frac{0.8}{3.1}$	$\frac{2.2}{14.0}$	$\frac{3.7}{32.0}$	$\frac{6.0}{6.1}$	$\frac{104}{105}$
3 Расчет с учетом образования усадочной полости реальных размеров	$\frac{0.8}{3.3}$	$\frac{2.7}{18.0}$	$\frac{4.6}{40.0}$	$\frac{6.0}{6.7}$	$\frac{104}{109}$
4. Расчет без учета образования усадочной полости	$\frac{1.2}{4.7}$	$\frac{3.7}{26.2}$	$\frac{6.0}{54.0}$	$\frac{6.0}{7.8}$	$\frac{104}{124}$
5. расчет по формуле внешней задачи	$\frac{0.6}{2.0}$	$\frac{1.4}{7.0}$	$\frac{2.2}{16.0}$	$\frac{6.0}{3.8}$	$\frac{104}{57}$