

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

В.В. Харьков, А.Н. Николаев

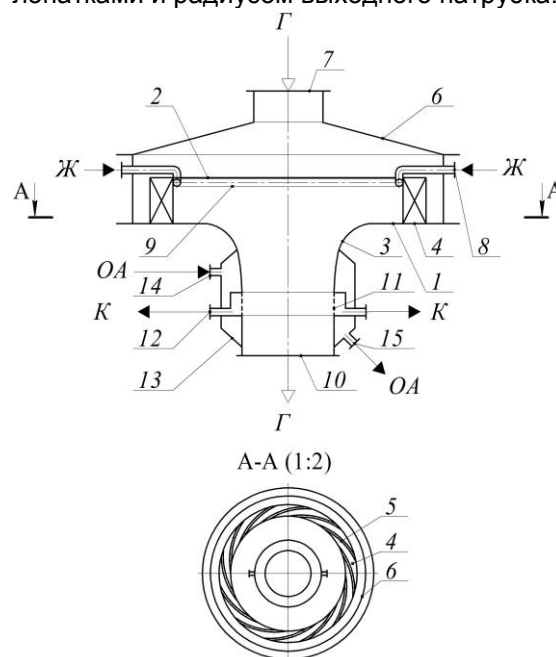
Разработан алгоритм расчета и выполнено численное исследование теплообмена в закрученном газок капельном течении. Расчет вихревой камеры с тангенциально-лопаточным завихрителем при концентрировании термолабильной жидкости с известными свойствами основывается на законах сохранения массы и энергии, а также на условии, что необходимое время процесса испарения, обусловленное кинетикой процесса, должно обеспечиваться конструкцией камеры и завихрителя, определяемых гидроаэродинамическими закономерностями в аппарате и особенностями тепло- и массообмена.

Ключевые слова: вихревая камера, термочувствительность, испарение капель, математическое моделирование, тангенциальный завихритель

Концентрирование — сложный и энергоёмкий процесс, а выбор метода и подходящей технологической установки для его проведения основывается прежде всего на виде раствора и его свойствах. Термолабильные продукты широко распространены в химической промышленности (большинство продуктов и полупродуктов органического синтеза), в биотехнологии и микробиологии (ферментные препараты, дрожжевые растворы и т.д.), в пищевой промышленности (фруктовые овощные соки, молоко и т.д.). Применение традиционных тепловых способов обезвоживания имеют ограничения для термолабильных растворов и требуют дополнительных расчётов параметров процесса для достижения минимально возможной конечной влажности при сохранении целевого вещества, что связано со специфическими свойствами этих продуктов, обусловленных снижением концентрации основного вещества вследствие активизации процессов его термического разложения при длительном воздействии даже относительно невысокой температуры (45...90 °С).

В химической технологии широкое применение находят аппараты со взвешенным слоем. Один из видов такого технологического оборудования для концентрирования термолабильных жидкостей представляет собой неподвижную цилиндрическую камеру с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа (рис. 1). Горячий воздух подается через газораспределительное устройство в рабочую камеру. Пройдя через тангенциально-лопаточный завихритель, газ получает вращательное движение, и в рабочей зоне камеры образуется закрученный газовый поток.

Исходный раствор через отверстия в трубчатом распределителе попадает в камеру, где моментально дробится высокоскоростным потоком газа на капли, образуя взвешенный вращающийся газожидкостный слой между лопатками и радиусом выходного патрубка.



1 — корпус; 2 — крышка; 3 — днище; 4 — тангенциальный завихритель; 5 — лопасти; 6 — газораспределительное устройство; 7 — патрубок ввода греющего газа (Г); 8 — патрубок ввода жидкости (Ж); 9 — трубчатый ороситель; 10 — патрубок выхода газа; 11 — целевой отсекатель; 12 — патрубок вывода концентрированной жидкости (К); 13 — охлаждающая рубашка; 14, 15 — патрубки ввода/вывода охлаждающего агента (ОА)

Рисунок 1 — Вихревая камера

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Внутренняя поверхность камеры нагревается и приближается к температуре греющего газа, попадание капель на нее грозит разложением нетермостойких веществ и пригоранием. Капли, двигаясь в вихревой камере, выходят на теоретические равновесные радиусы, соответствующие диаметру капель и параметрам работы камеры, и вращаются на нем, создавая взвешенный слой, без контакта с нагретыми поверхностями.

Под действием силы тяжести капли смещаются вниз, по мере испарения уменьшаются их диаметры и равновесные радиусы вращения, радиальное положение капельного слоя стремится к оси. Радиус выходного патрубка определяется равновесным радиусом капель с диаметром, соответствующим требуемому содержанию сухих веществ. В нижней части днища, где происходит осаждение капель жидкости на стенке, для предотвращения разложения целевого вещества смонтирована охлаждающая рубашка. Концентрированный раствор проходит через сепарационные щели и выводится из вихревой камеры. Газ удаляется через центральный нижний патрубок.

При работе вихревой камеры без рециркуляции жидкости вся жидкая фаза с начальной концентрацией целевого сухого вещества однократно взаимодействует с газом и выводится из камеры с требуемой конечной концентрацией. При работе камеры с рециркуляцией жидкости, прошедшая через рабочую зону камеры жидкость попадает в циркуляционный контур, и, смешиваясь со свежей исходной жидкостью, вновь поступает в аппарат. Согласно рециркуляционной схеме содержание сухих веществ в поступающей жидкости выше, чем без рециркуляции. При помощи рециркуляции, можно интенсифицировать процесс концентрирования в камере и увеличить конечную концентрацию.

Обзор классических и современных работ, посвященных исследованию динамического взаимодействия частиц дисперсной фазы с несущей средой в двухфазных системах, представленный в работах [1–3], показал, что использование закрученных потоков в технических устройствах ограничено сложностью и отсутствием достоверных экспериментальных и расчетных данных о характеристиках течения и теплообмене в таких потоках.

При расчете вихревого оборудования необходимо определение параметров аппарата и его эффективности, основанные на реальной гидроаэродинамической обстановке в рабочей зоне и особенностей тепло- и массообмена. В работе [4] приведена мате-

матическая модель движения испаряющейся капли жидкости в закрученном потоке теплоносителя в вихревой камере в условиях взвешенного вращающегося капельного слоя при следующих допущениях:

- полидисперсный распыл капель заменяется монодисперсным, в качестве основного параметра усреднения выбран объемно-поверхностный диаметр;
- процесс теплообмена рассматривается в квазистационарном приближении;
- все физические свойства газа, обтекающего каплю, определяются при осредненных величинах: при средней температуре в тепловом пограничном слое у капли и при средней концентрации пара в диффузионном пограничном слое;
- принимается модель идеального перемешивания газа в вихревой камере;
- жидкость в начальный момент времени находится при температуре фазового перехода.

Движение капли жидкости в неподвижной цилиндрической системе координат в вихревой камере описывалось системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_r}{d\tau} = \frac{V_\varphi^2}{r} + \frac{3 \rho_\Gamma}{4 \rho_{\text{ж}}} c_a \frac{V_{\text{отн}}}{a} (W_r - V_r) \\ \frac{dV_\varphi}{d\tau} = -\frac{V_r V_\varphi}{r} + \frac{3 \rho_\Gamma}{4 \rho_{\text{ж}}} c_a \frac{V_{\text{отн}}}{a} (W_\varphi - V_\varphi) \\ \frac{dV_z}{d\tau} = g + \frac{3 \rho_\Gamma}{4 \rho_{\text{ж}}} c_a \frac{V_{\text{отн}}}{a} (W_z - V_z) \\ \frac{dr}{d\tau} = V_r; \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{V_\varphi}{r}; \quad \frac{dz}{d\tau} = V_z \\ \frac{da}{d\tau} = -2 \frac{\beta_y}{\rho_{\text{ж}}} (y_s - y). \end{array} \right. , \quad (1)$$

где r, φ, z — цилиндрические координаты; V_r, V_φ, V_z — компоненты вектора абсолютной скорости капли; W_r, W_φ, W_z — компоненты вектора скорости газа; $\rho_\Gamma, \rho_{\text{ж}}$ — плотность газа и жидкости; c_a — коэффициент аэродинамического сопротивления капли:

$$c_a = 24 / \text{Re}_k + 4 / \text{Re}_k^{1/3},$$

Re_k — число Рейнольдса капли; τ — время; a — диаметр капли; β_y — коэффициент массоотдачи; y_s, y — концентрация пара воды газовой смеси на поверхности капли и вне пограничного слоя соответственно; $V_{\text{отн}}$ — скорость капли относительно газа:

$$V_{\text{отн}} = \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\varphi - V_\varphi)^2 + (W_z - V_z)^2}.$$

В силу сложности структуры закрученных газовых потоков вопрос об их математическом моделировании был заменен вопросом об их описании с помощью закономерностей, имеющих хорошее соответствие экспериментальных профилей скорости с результатами аналитических расчетов, полученных для закрученных потоков [6].

В общем виде закономерность изменения профиля тангенциальной составляющей скорости по радиусу подчиняется закону сохранения циркуляции и может быть описана выражением:

$$W_{\varphi} r^m = \text{const.} \quad (2)$$

Профиль тангенциальной составляющей скорости W_{φ} , соответствующий потенциальному течению, имеет вид:

$$W_{\varphi} = W_{\varphi R} \frac{R}{r}, \quad (3)$$

где $W_{\varphi R}$ — тангенциальная компонента скорости газа у лопастей завихрителя на радиусе R (вблизи лопастей завихрителя), определяется с учетом геометрии завихрителя:

$$W_{\varphi R} = W_{\text{вх}} \cos(\alpha) \varepsilon, \quad (4)$$

где α — угол наклона лопастей к плоскости, касательной к боковой поверхности завихрителя; $W_{\text{вх}}$ — среднерасходная скорость газа в живом сечении тангенциального завихрителя:

$$W_{\text{вх}} = Q / enH, \quad (5)$$

Q — расход газа e — ширина входной щели, для тангенциального завихрителя; n — количество лопастей завихрителя; H — высота цилиндрической части камеры; ε — эмпирический коэффициент сохранения скорости на входе в камеру.

В соответствии с этим получается, что:

$$W_{\varphi} = \frac{Q \cos(\alpha) \varepsilon}{2rnH \sin(\pi/n) \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{n}\right)}. \quad (6)$$

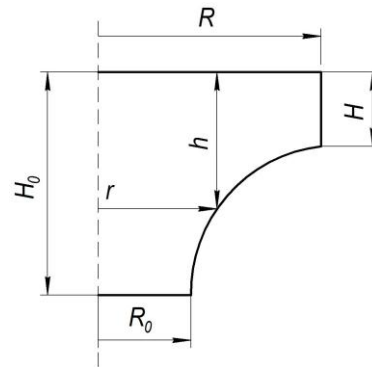
Радиальная компонента скорости газа W_r находится из условия постоянства расхода газа через цилиндрические сечения камеры

$$2\pi R H W_{rR} = 2\pi r h W_r = Q, \quad (7)$$

где W_{rR} — радиальная составляющая скорости газа на радиусе R .

Геометрия криволинейного днища аппарата (рис. 2) описывается следующим соотношением:

$$h = H + (H_0 - H) \left(\frac{R - r}{R - R_0} \right)^b. \quad (8)$$



R — радиус вихревой камеры; R_0 — радиус выходного штуцера; H — высота цилиндрической части камеры; H_0 — общая высота камеры; h — расстояние от крышки камеры до точки радиуса r

Рисунок 2 — Геометрия вихревой камеры

Выражение для нахождения радиальной составляющей скорости газа в вихревой камере имеет вид:

$$W_r = \frac{Q}{2\pi r H} \frac{1}{1 + (\bar{H} - 1) \left(\frac{R - r}{R - R_0} \right)^b}, \quad (9)$$

где $\bar{H} = H_0/H$ — безразмерный коэффициент, характеризующий высоту камеры.

Система уравнения (1) при начальных условиях (10) представляет собой задачу Коши, которая решалась методом численного интегрирования. В работе использовался метод Рунге-Кутты четвертой степени (четвертого порядка точности) как один из самых точных и получивший наибольшее распространение для решения прикладных задач гидродинамики.

$$\tau = 0, r = r_1, \varphi = 0, z = z_1, V_r = V_{r_1}, \quad (10)$$

$$V_{\varphi} = V_{\varphi_1}, V_z = 0, a = a_1$$

где r_1 — начальный радиус ввода жидкости (радиус оросителя); z_1 — расстояние от крышки камеры (высота ввода жидкости); V_1 — скорость истечения жидкости из оросителя; a_1 — начальный диаметр капли.

Характерными элементами алгоритма сформированного расчета являются:

1) определение температуры на поверхности испаряющихся капель t_s методом последовательных приближений из условия динамического равновесия на межфазной поверхности:

$$\beta_y r_s (y_s - y) = \alpha (t - t_s), \quad (11)$$

где r_s — удельная теплота парообразования на поверхности капли; t — температура газа на отдалении от капли.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ
КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

2) влагосодержание X и температура t газа (паровоздушной смеси) корректируются на каждом шаге решения по выражениям:

$$X = X_1 + \Lambda(1 + X_1) \left(1 - \frac{\rho_{ж2}}{\rho_{ж1}} \delta^3 \right), \quad (12)$$

$$t = \frac{t_1(\bar{c}_p' + X_1\bar{c}_p'') - \Lambda(1 + X_1) \left(1 - \frac{\rho_{ж2}}{\rho_{ж1}} \delta^3 \right) (r_s - \bar{c}_p t_s)}{\Lambda(1 + X_1) \left(1 - \frac{\rho_{ж2}}{\rho_{ж1}} \delta^3 \right) \bar{c}_p + \bar{c}_p' + X_1\bar{c}_p''} \quad (13)$$

где X_1, t_1 — влагосодержание и температура газа на входе; Λ — отношение массовых расходов жидкости и газа на входе в камеру; $\rho_{ж2}/\rho_{ж1}$ — отношение конечной и начальной плотности капли; $\delta = a_2/a_1$ — отношение конечного и начального диаметра капель; $\bar{c}_p, \bar{c}_p', \bar{c}_p''$ — средняя изобарная теплоемкость паровоздушной смеси, сухого воздуха и водяного пара соответственно.

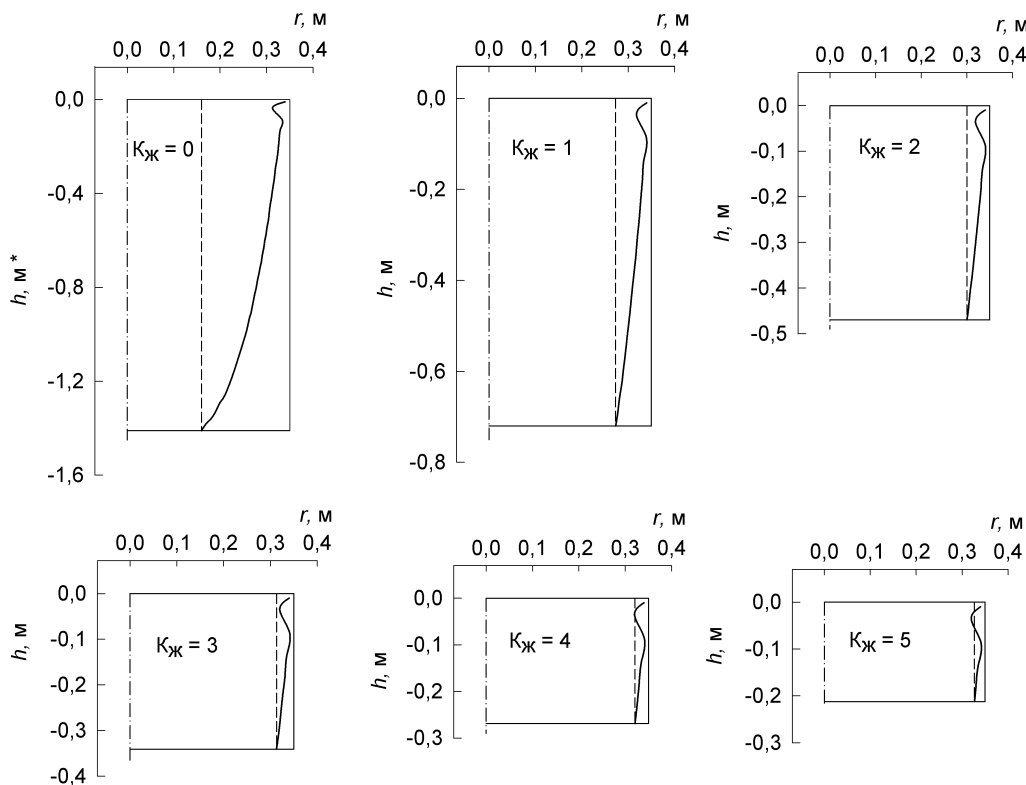
Расчеты проводились для газожидкостной системы паровоздушная смесь — термолabileльный раствор с известными физическими свойствами. Необходимым условием окончания процесса концентрирования

является достижение требуемого конечного содержания сухих веществ в концентрате (70 %), которому соответствует конечный диаметр капли a_2 , рассчитанный по формуле:

$$a_2 = a_1 \left(\frac{\rho_{ж1} c_0}{\rho_{ж2} c_2} \right)^{1/3} \quad (14)$$

где c_0 — концентрация раствора на входе в камеру с учетом рецикла.

Расчет траекторий капель в вихревой камере радиусом $R = 0,35$ м, работающей по принципу принудительной циркуляции концентрируемой жидкости показал, что достаточная высота цилиндрической части камеры H и требуемый диаметр выходного патрубка R_0 определяются кратностью циркуляции жидкой фазы $K_{ж}$ которая сопряжена с конечным диаметром капель с координатами (h, r) и условиях $h = H, r = R_0$. Капли с увеличением кратности циркуляции имеют большую массовую долю сухих веществ на входе и для достижения нужной степени концентрирования проходят более короткий путь, сокращая время пребывания продукта в камере (рис. 3).



$$\alpha = 35^\circ; n = 12; W_{вх} = 13 \text{ м/с}; L_m/G_m = 0,2; V_{\varphi_1} = 8,5 \text{ м/с}; a_1 = 0,25 \text{ мм}$$

Рисунок 3 — Проекция траектории капель на продольное сечение вихревой камеры:

Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована

для численного эксперимента при исследовании поведения испаряющихся капель в

вихревой камере по времени в зависимости от диаметра капель, кратности циркуляции жидкости, начальной температуры воздушной среды, при изменении конструктивных параметров завихрителя и нагрузки по жидкой фазе, а также от начальных условий движения: источника и направления истечения дисперсной фазы. Полученные зависимости могут быть заложены в инженерную методику для расчета условий, необходимых для концентрирования нетермостойких растворов в цилиндрической вихревой камере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчаренко, А. Г. Математическая модель двухфазного течения в смежных проницаемых каналах / А. Г. Овчаренко, Ф. Ф. Спиридонов, Т. М. Тушкина // Ползуновский вестник. — 2006. — №2. — С. 115–121.
2. Pakhomov, M. A. Numerical simulation of turbulent swirling gas-dispersed flow behind a sudden tube expansion / M. A. Pakhomov, V. I. Terekhov // Thermophys. Aeromech. — 2015. — V. 22. — no. 5. — P. 597–608.
3. Лаптев, С. А. Закономерности поведения двухфазного газожидкостного потока в вихревых аппаратах / С. А. Лаптев // Вестник технологического университета. — 2015. — Т. 18. — № 23. С. 116–118.
4. Харьков, В. В. Моделирование тепло- и массообмена при концентрировании соков в вих-

ревой камере / В. В. Харьков // Научно-технический вестник Поволжья. — 2016. — № 1. — С. 37–44.

5. Харьков, В. В. Анализ сил, определяющих движение капель в закрученном газовом потоке / В. В. Харьков, А. А. Овчинников // Вестник технологического университета. — 2015. — Т. 18. — № 9. — С. 106–109.

6. Гольдштик, М. А. Аэродинамика вихревой камеры / М. А. Гольдштик, А. К. Леонтьев, И. И. Палеев // Теплоэнергетика. — 1961. — № 2. — С. 40–45.

Харьков Виталий Викторович, ассистент кафедры оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»), v.v.kharkov@gmail.com.

Николаев Андрей Николаевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой оборудования пищевых производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»).