

Методика расчета температуры рабочего агента в аппарате с газовыми инфракрасными горелками

Вороненко Б.А., Демидов С.Ф., Демидов А.С.

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

Определена аналитическая зависимость температуры рабочего агента по высоте аппарата, содержащего инфракрасные горелки “Унифицированная”, от динамических и конструктивных параметров.

Ключевые слова: рабочий агент, сушка, нагрев, математическая модель, природный газ, инфракрасная газовая горелка, аппарат, изменение температуры.

Сушка является одним из важнейших технологических процессов в различных отраслях промышленности. Но существующее традиционное аппаратное оформление процессов сушки не всегда может удовлетворить возросшие требования потребителей.

В течение ряда лет авторами ведутся работы по созданию технологического оборудования для сушки растворов, сыпучих материалов с конвективным подводом тепла [1, 2]; нами сделана попытка математического исчисления процесса разогрева теплоносителя в аппаратах с принудительной конвекцией [3, 4]. Для прямого способа нагрева рабочего агента был разработан инфракрасный газовый аппарат [5].

Целью данной статьи является определение зависимости температур рабочего агента по высоте аппарата от конструктивных и динамических параметров.

Аппарат (рис. 1) содержит корпус 1 с патрубками ввода 2 и вывода 3 теплоносителя, расположенными соответственно на его верхней и нижней стенках, фильтр 4, панели 5 с инфракрасными горелками «Унифицированная», помещенными внутри теплогенератора на боковых стенках, разделительную стенку 6, размещенную на продольной оси корпуса 1 и установленные по обе ее стороны группы направляющих пластин 7, причем последние в каждой группе размещены последовательно одна за другой наклонно к разделительной стенке с увеличивающимся в сторону патрубка ввода углом наклона и образованием

между смежными пластинами перепускных каналов с выходом, направленным на упомянутые панели инфракрасных газовых горелок «Унифицированная».

Природный газ, сгорая в камере горелки «Унифицированная», нагревает специальную керамическую поверхность до темно-красного свечения, которая отдает тепло термоизлучением рабочему агенту.

Рабочий агент поступает в корпус аппарата 1 через патрубок 2 ввода, проходит фильтр 4 и разделительной стенкой делится на два потока, эти потоки интенсивно перемешиваются вблизи панелей 5 с инфракрасными горелками. Теплоноситель нагревается до заданной температуры.

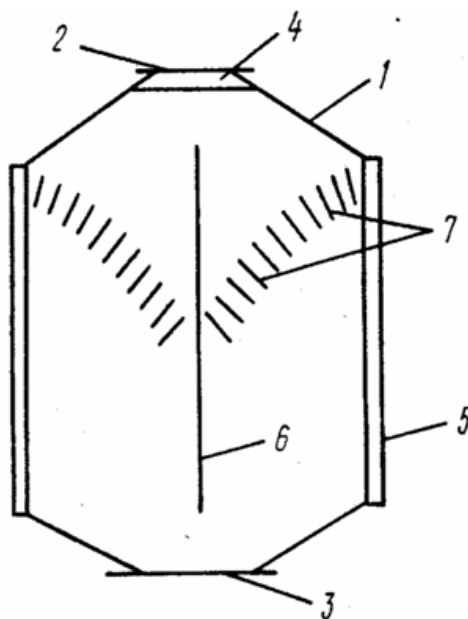


Рис. 1. Сушильный аппарат с газовыми инфракрасными горелками.

При разработке математической модели процесса нагрева рабочего агента для сушильного аппарата используем одномерное уравнение конвективной теплопроводности с постоянными коэффициентами и источником теплоты применительно к камере в форме конечного теплопроводящего стержня длины l , боковая поверхность которого теплоизолирована:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w \frac{\partial t}{\partial x} = D \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho c}, \quad (1)$$

$(0 < \tau < \infty, 0 < x < l).$

Учтем следующие краевые условия:

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const}; \quad (2)$$

$$t(0, \tau) = t_1 = \text{const}; \quad (3)$$

$$t(l, \tau) = t_2 = \text{const}, t_0 < t_1 < t_2. \quad (4)$$

Здесь (2) – начальное условие (равномерное распределение температуры по всему объему (длине теплоносителя в момент его нагрева); (3) и (4) – граничные условия первого рода, задающие значения температуры на торцевых сечениях (концах) стержня, что соответствует заданным постоянным температурам на стенках рабочей камеры.

Рассмотрим решение краевой задачи (1) – (4) последовательно для двух случаев.

I. Отсутствует внутренний источник теплоты: $q_v = 0$.

Посредством применения подстановки М. Смолуховского [6]

$$t = \theta e^{\frac{\omega}{2D}x - \frac{\omega^2}{4D}\tau} \quad (5)$$

система уравнений (1) – (4) сводится к более простой системе:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}; \quad (6)$$

$$\theta(x, 0) = t_0 e^{\frac{\omega x}{2D}}; \quad (7)$$

$$\theta(0, \tau) = t_1 e^{\frac{\omega^2 \tau}{4D}}; \quad (8)$$

$$\theta(l, \tau) = t_2 e^{\frac{\omega l}{2D} + \frac{\omega^2 \tau}{4D}}. \quad (9)$$

Решая задачу (6) – (9) методом интегрального преобразования Лапласа и затем используя обратный переход к искомой величине – температуре – по формуле (5), окончательное распределение температуры в потоке теплоносителя получено в следующем виде:

$$\begin{aligned} T(X, Fo) = & \\ = e^{\frac{1}{2}PeX} & \left[\frac{T_1 sh\left(\frac{1}{2}Pe(1-X)\right) + e^{-\frac{1}{2}Pe} sh\left(\frac{1}{2}PeX\right)}{sh\left(\frac{1}{2}Pe\right)} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n 2n\pi a_n (T_1 \sin(n\pi(1-X)) + \right. \\ & \left. + e^{-\frac{1}{2}Pe} \sin(n\pi X)) e^{-\frac{1}{a_n}Fo} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

$$\text{где } a_n = \frac{1}{(n\pi)^2 + \left(\frac{1}{2}Pe\right)^2}.$$

Для малых значений числа Fo решение (10) мало удобно. Операционный метод позволяет получить решение в другой форме, наиболее пригодной для малых значений Fo . Для этого случая решение получено в виде

$$T(X, Fo) = \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}Pe(1-X)} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 Cni + \frac{1}{2} T_1 e^{-\frac{1}{2}PeX} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 Dni, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} Cn_1 &= e^{-\frac{1}{2}(2n-1-X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2n-1-X}{\sqrt{Fo}} - Pe\sqrt{Fo}\right)\right) + e^{\frac{1}{2}(2n-1-X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2n-1-X}{\sqrt{Fo}} + Pe\sqrt{Fo}\right)\right); \\ Cn_2 &= e^{-\frac{1}{2}(2n-1+X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2n-1+X}{\sqrt{Fo}} - Pe\sqrt{Fo}\right)\right) + e^{\frac{1}{2}(2n-1+X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2n-1+X}{\sqrt{Fo}} + Pe\sqrt{Fo}\right)\right); \\ Dn_1 &= e^{-\frac{1}{2}(2(n-1)+X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2(n-1)+X}{\sqrt{Fo}} - Pe\sqrt{Fo}\right)\right) + e^{\frac{1}{2}(2(n-1)+X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2(n-1)+X}{\sqrt{Fo}} + Pe\sqrt{Fo}\right)\right); \\ Dn_2 &= -e^{-\frac{1}{2}(2n-X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2n-X}{\sqrt{Fo}} - Pe\sqrt{Fo}\right)\right) - e^{\frac{1}{2}(2n-X)Pe} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2n-X}{\sqrt{Fo}} + Pe\sqrt{Fo}\right)\right). \end{aligned}$$

II. Действует внутренний источник ИК-излучения:

$$q_v = \frac{P}{L} = const. \quad (12)$$

В этом случае решение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} T(X, Fo) &= PoFo + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n 2\pi a_n [(T_1 + a_n Po) \sin(n\pi(1-X)) + (1 + \\ &+ a_n Po) e^{-\frac{1}{2}Pe} \sin(n\pi X)] e^{-a_n Fo + \frac{1}{2}PeX} + \\ &+ e^{\frac{1}{2}PeX} \left[\frac{Po \left(sh(Pe(1-X)) + e^{-\frac{1}{2}Pe} sh\left(\frac{1}{2}PeX\right) \right) \left(1 - PeFo sh\left(\frac{1}{2}Pe\right) \right)}{sh^2\left(\frac{1}{2}Pe\right)} + \right. \\ &\left. T_1 sh\left(\frac{1}{2}Pe(1-X)\right) + e^{-\frac{1}{2}Pe} PeX - \frac{Po}{Pe} \left((1-X) ch\left(\frac{1}{2}Pe(1-X)\right) + Xe^{-\frac{1}{2}Pe} ch\left(\frac{1}{2}PeX\right) \right) \right] \\ &+ \frac{\quad}{sh\left(\frac{1}{2}Pe\right)} \end{aligned} \quad (13)$$

Изложенный метод использовался при расчете габаритов аппарата для нагрева рабочего агента сушки молочных продуктов в распылительной сушилке АО1-РЧ 500 кг/исп влаги (расход воздуха 30000 м³/ч) и в сушилке со слоем инертных тел (3000 м³/ч) приведен в табл. 1.

Табл. 1.

Расход воздуха м ³ /ч	Количество горелок	Ширина аппарата, м	Длина аппарата, м	Высота зоны нагрева, м	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С
3000	24	0,98	1,12	0,42	20	180
30000	192	1,40	2,24	1,72	20	180

Обозначения

$t = t(x, \tau)$ - температура газовой среды (агента) в рабочей камере, °С, К;
 t_0 - начальная температура; t_1 и t_2 - температуры стенок камер; x - текущая координата, м; L - длина камеры, м; τ - время, с; ω - скорость потока агента, м/с; D - коэффициент продольного перемешивания, м²/с; q_v - объемная мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³; ρ - плотность движущегося потока воздуха, кг/м³ (приблизительно, в условиях давления в камере, считаем движущийся поток воздуха несжимаемой жидкостью, т.е. принимаем $\rho = \text{const}$); c - удельная теплоемкость агента, Дж/(кг · К).

$$T(x, Fo) = \frac{t(x, \tau) - t_0}{t_2 - t_0} - \text{безразмерная температура};$$

$$X = \frac{x}{R} - \text{безразмерная координата};$$

$$Pe = \frac{wl}{D} - \text{число Пекле};$$

$$Fo = \frac{D\tau}{l^2} - \text{число Фурье};$$

$$\frac{Pl^2}{D(t_2 - t_0)} = Po - \text{число Померанцева};$$

$$P = \frac{E_0}{L};$$

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \text{поверхностная плотность потока интегрального излучения, Вт/м}^2$$

[8]

$C_0 \approx 5,76$ - излучательная способность абсолютно черного тела, Вт/(м² · К⁴);

$$L = 2\pi R;$$

T - абсолютная температура излучающего тела, К;

$shz = \frac{1}{2}(e^z - e^{-z})$ - синус гиперболический;

$erfz = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz$ - функция ошибок Гаусса [9];

$erfcz = 1 - erfz = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-z^2} dz$

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 1557437, F26 В 17/10. Способ сушки пищевых термочувствительных материалов с повышенной адгезией и аппарат для его осуществления [Текст]/ Демидов С.Ф., Молочников В.В., Мангуш А.Н., Мартынов Ю.В.: заявитель Северо-Кавказский филиал всесоюзного научно-исследовательского института маслодельной и сыродельной промышленности и Институт проблем механики АН СССР- №3837254/31-13; заявл. 09.01.85;опубл. 15.04.90, Бюл. №14. – 5 с.
2. Авторское свидетельство СССР № 1192764, F26 В 3/06. Способ сушки меланжа[Текст]/ Демидов С.Ф., Молочников В.В., Мартынов Ю.В.: заявитель Северо-Кавказский филиал всесоюзного научно-исследовательского института маслодельной и сыродельной промышленности и Институт проблем механики АН СССР. - №3802200/28-13; заявл. 17.10.84;опубл. 23.11.85, Бюл. №43. – 4 с.
3. Вороненко Б.А., Белобородов В.В., Шпак Е. ., Микрюков В.В., Разработка математической модели и алгоритма расчета процесса разогрева теплоносителя в аппарате с принудительной конвекцией // Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции «Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания»; Харьков, 1981.-с.291-292.
4. Вороненко Б.А., Белобородов В.В. Общая постановка задачи разогрева жарочно-пекарного шкафа // Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции «Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания», Харьков, 1981.-с.310-311.
5. Авторское свидетельство СССР № 1703923, F24 Н 3/00. Теплогенератор[Текст]/ Демидов С.Ф., Мартынов Ю.В., Овчинников А.Ю.: заявитель Волгоградское научно-производственное объединение “Волгомясомолмаш”. - №4704603/06; заявл. 06.05.89;опубл. 07.01.92, Бюл. №1. – 4 с.
6. Малкович Р.Ш. Математика диффузии в полупроводниках.-СПб.: Наука, 1999.-389 с.

7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967-600 с.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов.-М.: Энергоиздат, 1981.-416 с.
9. Градштейн И.С., Рыжик И.М. таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.-М.:Физматгиз., 1963.-1100 с.

A method to calculate a working agent temperature in a drying apparatus with infrared gas-jets

Voronenko B.A., Demidov S.F., Demidov A.S.

Saint-Petersburg State University of Refrigeration
and Food Engineering

A working agent being heated with “Unified” type infrared gas-jets in drying apparatus, its temperature varying along the height of the apparatus, was analytically found to depend on dynamic and design parameters.

Keywords: working agent, drying, heating, natural gas, infrared gas-jet, device, apparatus, temperature change.