Термодинамическая модель пленочного покрытия таблеток на водной основе

Глен Иби

Глен Иби более 30 лет проработал в Thomas Engineering, в настоящее время – главный консультант компании по новым технологиям. Создатель программы TAAC, на которой базируется работа всех крупнейших фармацевтических компаний мира и с помощью которой производятся 10 самых массовых таблеток в мире. Обладатель многих патентов в области таблеточных прессов и коатеров. Один из основных авторов TSM (Международный стандарт таблетирования по конструкциям пресс-инструмента)

Растущий спрос на пленочные покрытия на водной основе, как для новых, так и для существующих продуктов, ведет к необходимости прогнозирования качества покрытий, произведенных в различных условиях окружающей среды. Можно вычислить фактор, влияющий на скорость высыхания покрытия, и параметры процесса, используя простые принципы термодинамики совместно с уравнениями теплообмена и передачи массы. Данный фактор используют, чтобы узнать, как добиться покрытия определенного качества в разных условиях. Это можно применять при изучении изменения параметров и оптимизации процесса.

В первой части статьи рассматривается процесс нанесения покрытия в крупном масштабе при использовании постоянных потоков воздуха, водяного пара и материалов покрытия, подающихся и выводящихся из машины нанесения покрытия (коатера). Соотношения между температурой, влажностью и потоком воздуха определяются с помощью массо-энергетических балансов. Во второй части статьи идет речь о взаимодействии рабочей камеры и раствора распыляемого покрытия. Представлены уравнения теплообмена и передачи массы. Скорость высыхания пленочного покрытия, которая связана с омываемой площадью рабочей камеры, измерена. Также обсуждается применение выведенной модели в производстве, в научно-исследовательских и конструкторских работах. Список терминологии и сокращений, использованных в статье, приведен на рис. 1.

История вопроса

Покрытие на водной основе быстро становится предпочитаемым методом для нанесения пленочного покрытия на фармацевтические таблетки. Популярность покрытия на водной основе связана

«Фармацевтическая отрасль», октябрь № 5 (40) 2013

A_H – площадь поверхности теплообмена
A_M – площадь поверхности передачи массы
C_P – удельная теплоемкость воздуха
h_{A1} – теплосодержание воздуха, поступающего в контрольный объем
h_{A2} – теплосодержание воздуха, выходящего из контрольного объема
h_{lg} – изменение теплоемкости воды
h_H – средний коэффициент теплопередачи
h_{LIQ} – теплосодержание жидкости, поступающей в контрольный объем
h_M – средний коэффициент передачи массы
h_V – теплосодержание водяного пара
h_{V1} – теплосодержание водяного пара, поступающего в контрольный объем
h_{V2} – теплосодержание водяного пара, выходящего из контрольного объема
Le – Число Льюиса
M – молекулярная масса воды
m – массовая скорость испарения воды
m_A – масса осушенного воздуха
m_{A1} – масса осушенного воздуха, поступающего в контрольный объем
m_{A2} – масса осушенного воздуха, выходящего из контрольного объема
m_{LIQ} – масса воды в жидком состоянии, поступающей в контрольный объем
m_V – масса водяного пара
m_{V1} – масса водяного пара, поступающего в контрольный объем
m_{V2} – масса водяного пара, выходящего из контрольного объема
p_V – парциальное давление водяного пара
p_W – парциальное давление водяного пара в условиях передачи массы
p_∞ – парциальное давление водяного пара в условиях свободного потока
R – универсальная газовая постоянная
T_B – температура поверхности теплопередачи
T_W – температура поверхности передачи массы
T_1 – температура воздуха на входе
T_2 – температура воздуха на выходе
T_∞ – температура свободного воздушного потока
w – удельная влажность
w_1 – удельная влажность воздуха на входе
w_2 – удельная влажность воздуха на выходе
ρ – плотность воздушного потока

Рис. 1. Список терминов и сокращений в статье

с многочисленными разработками формул пленочного покрытия, которые позволяют решить проблемы, связанные с липкостью, вязкостью, антиадгезионностью. Данные свойства достигаются при одновременном использовании вспомогательных веществ и применении определенных технологических приемов. Другие факторы, например, цена, безопасность и жесткие федеральные законы относительно сброса отходов, также играют важную роль при выборе систем покрытия на водной основе.

Широкое использование пленочного покрытия на водной основе порождает спрос на аналитическую технологию, способную точно описать взаимодействие параметров технологического процесса. Технология должна показывать, как изменения этих параметров отражаются на конечном продукте. Для изучения влияния технологических факторов были проведены многочисленные исследования. Ученые пытались создать математическую модель соответственных величин и проводили производственные испытания для получения необходимых данных. Далее информация собиралась с помощью метода аппроксимации кривых для создания уравнения / системы уравнений для использования в качестве модели процесса. Эти модели могут с точностью предсказать, как влияет изменение скорости распыления на 25 мл/мин на температуру выпускаемого воздуха, но при определении, как это изменение повлияет на пленочное покрытие, показания будут не очень четкими.

Основная проблема заключается в том, что хотя химические изменения, возникающие при испарении воды из раствора, предельно ясны, однако реальные условия, при которых возникают данные изменения, при детальном рассмотрении различаются. Например, очень трудно определить, как размер таблетки, форма, характер поверхности, содержание влаги и сцепление с пленкой подействуют на целостность конечного продукта. Также необходимо учитывать сложность количественной переменной, которую обычно называют *эстетическим качеством*. Это объясняет, почему универсальная модель пленочного покрытия на водной основе до сих пор не разработана. На самом деле это может и вообще не произойти.

Тем не менее, можно использовать метод анализа совместно с данными наблюдений для раскрытия сути процесса нанесения пленочного покрытия на водной основе. Вместо использования результатов экспериментов для разработки математической модели подход, описанный в данной статье, предполагает определение характеристик термодинамических отношений и отношений переноса массы во время нанесения покрытия и объединение их в одну переменную, обозначающую скорость высыхания пленочного покрытия.

Экспериментальные данные используются для определения скорости высыхания покрытия при производстве нужного количества покрывающего раствора. При разделении аналитических и практических аспектов процесса нанесения покрытия модель позволяет рассчитать параметры, не относящиеся к продукту, используя строгие уравнения. Модель также предполагает широкие возможности при обработке продуктов с различными характеристиками.

Первый закон термодинамики

Нанесение пленочного покрытия на водной основе – это процесс с использованием очищенного воздуха для выпаривания воды из

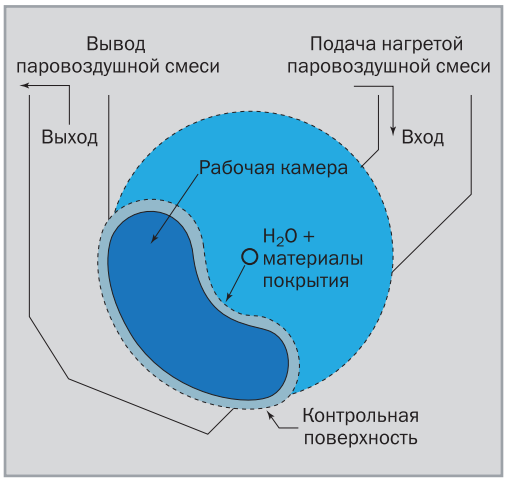

Рис. 2. Контрольный объем для анализа нанесения покрытия на таблетки

раствора покрытия, распыляемого в рабочей камере. Если температура, скорость потока, влажность входящего воздуха и скорость подачи раствора поддерживаются на одном уровне, то температура воздуха на выходе также остается постоянной, и баланс достигается спустя короткое время после начала процесса. Все, что поступает в коатер, легко сравнить с образующимися в процессе покрытия продуктами, поскольку системы с использованием перфорированных и полуперфорированных барабанов изолированы от окружающей среды.

На рис. 2 показана рабочая камера в барабане. В целях анализа направляющая плоскость вокруг камеры формирует границу системы покрытия, другими словами, *контрольный объем*. Нагретая паровоздушная смесь поступает в контрольный объем барабана вместе с раствором покрытия, который содержит воду и снижает температуру, при этом повышая влажность. Масса воздуха и воды (жидкость и пар), поступающая в контрольный объем, равна массе на выходе, если рабочая камера не увлажнена до точки насыщения.

Так как энергия, требуемая для выпаривания воды из раствора покрытия, поступает от входящего воздушного потока, пленочное покрытие на водной основе является адиабатическим процессом испарительного охлаждения. В результате полное теплосодержание системы остается постоянным, и первый закон термодинамики можно записать следующим образом:

$$m_{A1}h_{A1} + m_{V1}h_{V1} + m_{LIQ}h_{LIQ} = m_{A2}h_{A2} + m_{V2}h_{V2} \quad (1)$$

Обратите внимание на отношения между членами уравнения:

$$m_{A1} = m_{A2} = m_A;\ m_{LIQ} = m_{V2} - m_{V1};\ и\ w = m_V/m_A,$$

где w – уровень влажности.

Если уравнение первого закона термодинамики разделить на m_A и выполнить вышеперечисленные замены, то получится:

$$h_{A1} + m_{v1}h_{V1} + (w_2 - w_1)h_{LIQ} = h_{A2} + w_2h_{V2} \quad (2)$$

Перегруппировка и замена $C_p(T_1 - T_2)$ *на* $h_{A1} - h_{A2}$ дает следующее уравнение:

$$C_p(T_1 - T_2) + m_{v1}h_{V1} + (w_2 - w_1)\,h_{LIQ} - m_{v2}\,h_{V2} = 0 \quad (3)$$

Уравнение первого закона термодинамики определяет точные отношения между температурой, влажностью и скоростью входящего воздушного потока, скоростью подачи раствора, температурой и влажностью воздуха на выходе. Уравнение может быть использовано для того, чтобы определить, как увеличение скорости подачи раствора повлияет на температуру в рабочей камере. Его также можно использовать для определения показателя ускорения потока воздуха на входе для поддержания постоянной температуры воздуха на выходе. Примеры показывают, как применить растворы к этому уравнению, используя методы численного и графического решения.

Метод численного решения. Первый закон термодинамики можно записать в более удобной форме, приняв согласованную систему величин для каждой переменной. Такие величины, как футы, фунты, часы, Британские тепловые единицы и градусы по Фаренгейту, используются в данной статье, потому что большинство доступных таблиц данных и психрометрических таблиц используют английскую систему мер. Более того, такие обозначения, как *lbf* и *lbm*, обозначают *фунт силы* и *фунт массы* соответственно. Приведенные ниже объемы и отношения могут упростить выражение первого уравнения термодинамики для существенного диапазона температур: $C_p = 0{,}24\ Btu/lbm{-}^{\circ}F;\ h_V = 0{,}435T + 1061\ Btu/lbm;\ и\ h_{LIQ}$ *при* $70\ ^{\circ}F = 38\ Btu/lbm.$

Делая подстановки в уравнение 3, сокращаем уравнение первого закона термодинамики до:

$$T_1(0{,}24 + 0{,}435\,w_1) + 1023(w_1 + w_2) - T_2(0{,}24 + 0{,}435w_2) = 0 \quad (4),$$

где удельная влажность выражена в фунтах влаги на фунт сухого воздуха. Следующее числовое решение данного уравнения использует температуру входящего воздуха 158 °F (70 °C), скорость воздушного потока 2 000 кубических футов в минуту, удельную влажность 25 grains/lbm и скорость распыления раствора 300 г/минуту для раствора с содержанием 10 % твердых частиц. Удельная влажность входящего воздуха используется для расчета давления пара в воздухе на входе с помощью следующего уравнения:

$$p_1 = \frac{w_1\,x14{,}696}{0{,}622 + w_1} = 0{,}0839\ \text{lbf/sq} \quad (5),$$

где w_1 = 25 grains/lbm = 0,00357 lbm/lbm.

Удельная масса воздуха определяется с помощью следующего уравнения:

$$\rho = \frac{14{,}696 - P_1 \, x144}{53{,}34(460 + T_1)} = 0{,}0638 \text{ lbm осушенного воздуха на кубический фут} \quad (6)$$

Масса осушенного воздуха, поступающего в коатер, рассчитывается при помощи уравнения:

$$2000 \; cu \; ft/min \; x \; 0{,}0638 \; lbm/cu \; ft = 127{,}6 \; lbm/min \quad (7)$$

Скорость испарения воды из рабочей камеры определяется, как показано ниже:

$$\frac{300 \, g/\min}{454 \, g/lbm} x 90\% \, H_2O = 0{,}595 \, lbm \, H_2O/\min \quad (8)$$

Удельная влажность выпускаемого воздуха рассчитывается следующим образом:

$$w_2 = \frac{0{,}595}{127{,}6} + 0{,}00357 = 0{,}00823 \text{ lbm/lbm осушенного воздуха} \quad (9),$$

где $m_A(w_2 - w_1)$ = скорость испарения воды.

Температура поступающего воздуха и влажность выпускаемого воздуха подставляются в преобразованное уравнение первого закона термодинамики. В результате получается:

$$T_2 = 137 \, ^\circ F \quad (10)$$

Метод графического решения. На рис. 3 показана часть психрометрической диаграммы, где технологическая линия начерчена для температуры входящего воздуха 158 °F (70 °C), скорость входящего воздушного потока 2 000 кубических футов в мин, удельная влажность входящего сухого воздуха 25 grains/lbm и скорость распыления 300 г/мин для раствора с содержанием 10 % твердых частиц. Психрометрическая диаграмма содержит всю необходимую информацию для поиска w_2, удельной влажности выходящего воздуха. Когда данная величина будет известна, появится информация о данных входящего и выходящего воздуха.

На психрометрической диаграмме отмечается точка с координатами 158 °F сухого термометра и 25 grains/lbm влажности. Температура мокрого термометра в этой точке 79 °F. Затем удельный объем водопаровой смеси на входе будет равняться 15,7 cu ft/lbm сухого воздуха. Масса сухого воздуха, подающегося в коатер, рассчитывается по следующей формуле:

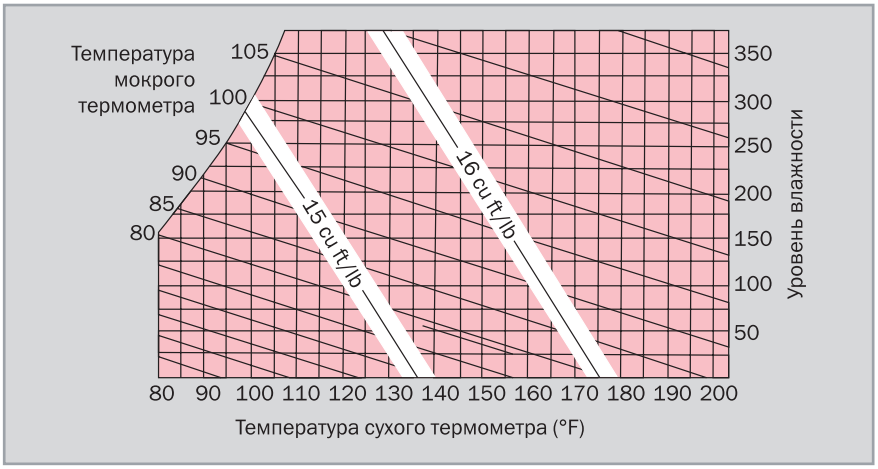

Рис. 3. График процесса нанесения пленочного покрытия

$$\frac{2000 \, cu \; ft/\min}{15{,}7 \, cu \; ft/lbm} = 127{,}4 \, lbm/\min \quad (11)$$

Скорость выпаривания воды из рабочей камеры рассчитывается по следующему уравнению:

$$\frac{300 \, g/\min}{454 \, g/\min} x 90\% \, H_2O = 0{,}595 \, lbm \, H_2O/\min \quad (12)$$

Удельная влажность выпускаемого воздуха рассчитывается с помощью уравнения:

$$w_2 = \frac{0{,}595}{127{,}4} x 7000 \text{ grains/lbm} + 25 = 58 \text{ grains/lbm} \quad (13)$$

Линия 79 °F мокрого термометра проводится из точки, которая обозначает условия для воздуха на входе, до точки, где она пересекает линию влажности 58 grain/lbm. Точка, поставленная в этом месте, и температура выпускаемого воздуха равняются 137 °F.

На практике измеряемая температура выходящего воздуха на несколько градусов ниже теоретического значения, так как описанная модель не учитывает эффекты распыляемого воздуха, изменения кинетической энергии рабочего воздуха и водяного пара, а также охлаждение окружающей средой.

Однако, это отклонение температуры в какой-то мере согласовывается с величиной параметров в большинстве процессов нанесения пленочного покрытия. Когда данное отклонение определено для набора оборудования, его можно применить к последующим анализам.

Эквивалентность окружающей среды

Критерии. Способность использовать первый закон термодинамики для расчета того, как изменения одного параметра процесса (или нескольких) затронут другие параметры – первый шаг в создании всеобъемлющей модели пленочного покрытия на водной основе. Несмотря на применимость первого закона термодинамики, он не соотносит условия окружающей среды с качеством полученного покрытия. Для этого необходимо более детальное изучение взаимодействия между рабочей камерой и распыляемым раствором. Перед решением уравнений теплопереноса и переноса массы, управляющих испарением воды с поверхности таблеток, необходимо определить критерии, позволяющие установить эквивалентность сред покрытия при разном наборе исходных условий.

Для определения данных критериев был проведен эксперимент, когда вентилятор продувает воздух комнатной температуры по поверхности пола, и вода медленно наливается на пол с постоянной

скоростью. Формируется бассейн со стоячей водой. Если скорость воздушного потока достаточно высока, бассейн расширится до момента, когда скорость воды, испаряющейся с его поверхности, будет равна скорости, с которой вода наливалась. Когда в бассейне достигаются равновесные условия, можно измерить его площадь и вычислить скорость высыхания на единицу площади.

Если данный эксперимент будет проводиться при постоянной комнатной температуре, при низкой влажности в условиях зимы и при повышенной влажности летом, то площадь бассейна летом будет больше, чем зимой. Это происходит, потому что скорость высыхания на единицу площади выше при низкой влажности, так как одинаковое количество воды испаряется с меньшей поверхности. При изменении температуры осушающего воздуха или его скорости потока скорость высыхания на единицу площади может оставаться на одном уровне и летом, и зимой. Если вода наливается с установленной скоростью, бассейн будет занимать одну и ту же площадь в течение всего года. Хотя условия окружающей среды различны, испарение воды останется на одном уровне.

Основополагающие принципы расчета равных скоростей сушки могут быть применены в процессе нанесения пленочного покрытия. Площадь, которую занимает бассейн, соответствует увлажненной поверхности рабочей камеры. Чем выше скорость осушения, тем меньше увлажненная поверхность. В свою очередь, если осушение происходит слишком медленно по сравнению со скоростью распыления, то увлажненная площадь будет больше. Так как на качество покрытия влияет скорость высыхания пленки, заданное качество покрытия при других условиях окружающей среды будет достигнуто, как только установится фиксированная скорость высыхания.

Хотя процесс осушения в рабочей камере, где содержатся сотни тысяч таблеток, намного сложнее, чем испарение воды с поверхности бассейна, общие условия процесса представляют собой среднее значение того, что происходит на микроскопическом уровне. Вместо рассмотрения процесса испарения воды из небольшого количества раствора лучше изучить скорость постоянного осушения большого количества раствора. В данном случае концепция поддержания фиксированной скорости осушения увлажненной поверхности может быть использована для расчета качества покрытия.

Теория. Испарение воды с поверхности таблеток включает в себя конвективную теплопередачу и передачу массы. Скорость конвективной теплопередачи равна среднему коэффициенту теплопередачи, умноженному на площадь отдающей поверхности и разницы температур воздушного потока и поверхности отдачи. Скорость теплопередачи также равна массовой скорости испарения, умноженной на изменение теплосодержания воды. Это выражено в следующем уравнении:

$$h_H A_H (T_\infty - T_B) = mh \qquad (14)$$

Данное сооотношение верно, потому что энергия, необходимая для испарения воды из рабочей камеры, поступает от входящего воздушного потока.

Уравнение конвективной передачи массы соответствует по форме уравнению теплопередачи, за исключением того, что в качестве раскачивающего потенциала вместо температуры используется разница давления водяного пара. Это уравнение выражается в следующем [2]:

$$h_m A_m \left[\frac{Mp_{11}}{RT_{11}} - \frac{Mp_\infty}{RT_\infty} \right] = m \qquad (15)$$

Между уравнениями 14 и 15 можно поставить знак равенства, потому что оба содержат переменные массовой скорости испарения воды. В результате получается уравнение, соотносящее площадь, на которой происходит теплопередача, с площадью, подвергающейся воздействию передачи массы – увлажненная площадь рабочей камеры:

$$\frac{A_H}{A_M} = \frac{\left[\frac{Mp_{11}}{RT_{11}} - \frac{Mp_\infty}{RT_\infty} \right] h_m h}{h_H (T_\infty - T_B)} \qquad (16)$$

Для решения уравнения 16 должны быть установлены величины каждой переменной справа от знака «равно». Числитель относится ко всем параметрам, вовлеченным в перенос массы, кроме переменной теплосодержания. Индекс w относится к условиям взаимодействия воды и воздуха. Для этих переменных используется температура мокрого термометра, потому что процесс тепловлагообмена, т.е. насыщения воздуха, является адиабатическим. Знаменатель выводится из уравнения теплообмена и в результате представляет собой среднее значение поверхности теплообмена.

Экспериментальные данные, собранные автором, а также измерения температуры с помощью инфракрасного излучения в обычных рабочих камерах во время процесса нанесения покрытия показали, что средняя температура массы и температура воздуха на выходе одинаковые [3]. Поэтому переменные теплопереноса температуры поверхности и теплосодержания определяются с помощью температуры воздуха на выходе. Молекулярная масса воды, универсальная газовая постоянная, температура и давление насыщенного пара воздуха – это известные параметры. Только уровень коэффициентов теплопереноса и переноса массы остаются неизвестными.

Индивидуальные величины для каждого коэффициента трудно подсчитать, так как объемы зависят от геометрических построений. Тем не менее, значение двух коэффициентов сводится к простому выражению [4]:

$$\frac{h_H}{h_M} = \rho Cp(Le^{2-1}) \qquad (17)$$

Число Льюиса, Le, это безразмерная величина, которая соотносит скорости тепловой диффузии с поверхности со скоростью массовой диффузии. Так как число Льюиса не зависит от температуры и приблизительно равно единице, переменные из уравнения 17 можно убрать. Умножая переменные плотности воздуха и удельной теплоемкости, а также подставляя результат значения коэффициентов теплопереноса и переноса массы в уравнение, получаем следующее уравнение:

$$\frac{A_H}{A_M} = \frac{\left[\frac{Mp_{11}}{RT_{11}} - \frac{Mp_\infty}{RT_\infty}\right] h_{11}}{\rho Cp(T_\infty - T_B)} \qquad (18)$$

Данное уравнение представляет собой относительное измерение скорости испарения воды с поверхности рабочей камеры. Как сказано выше, эмпирическое испытание необходимо для определения условий окружающей среды, влияющих на нанесение покрытия приемлемого качества при заданной комбинации продукта и покрытия. После определения данных условий выделенные для параметров величины могут быть использованы в уравнении теплопереноса и переноса массы для расчета фактора эквивалентности окружающей среды (ЕЕ), который равен $A_н/A_м$. После того как данный фактор определен, каждый из параметров, описывающих окружающую среду при покрытии, может быть изменен: пока фактор ЕЕ удерживается на одном значении, качество покрытия на выходе будет оставаться стабильным.

Пример. Предположим, что при определенном сочетании

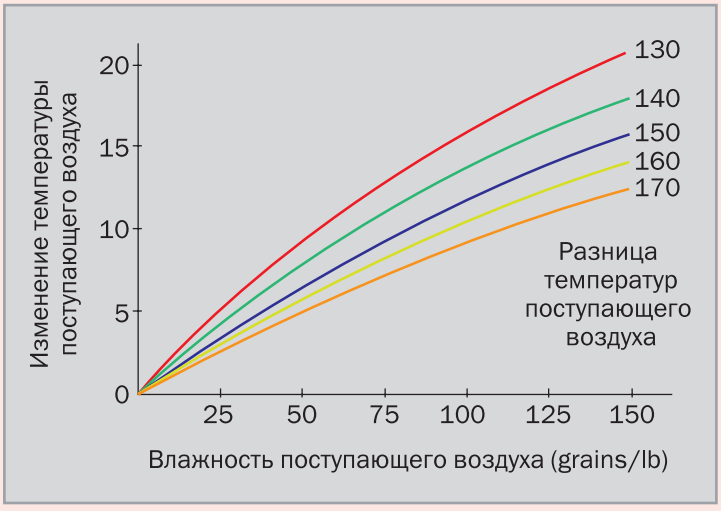

Рис. 4. Величина компенсации температуры как функция влажности
Скорость воздушного потока = 2 000 куб. футов / мин
Скорость распыления = 300 г H_2O / мин

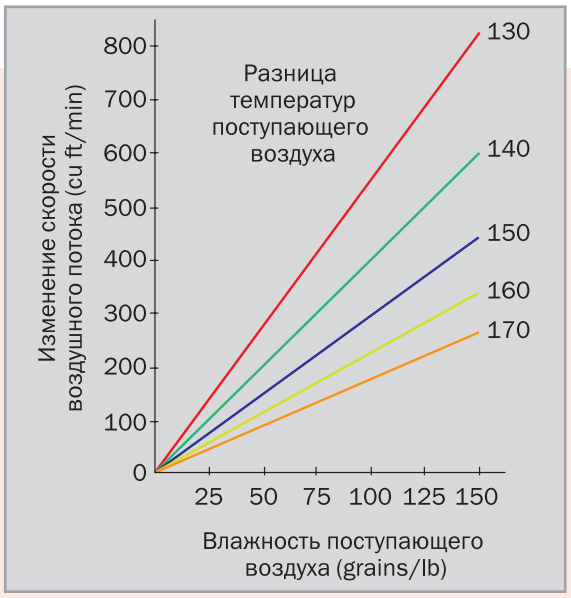

Рис. 5. Величина компенсации скорости поступающего воздушного потока как функция влажности
Скорость воздушного потока = 2 000 куб. футов / мин
Скорость распыления = 300 г H_2O / мин

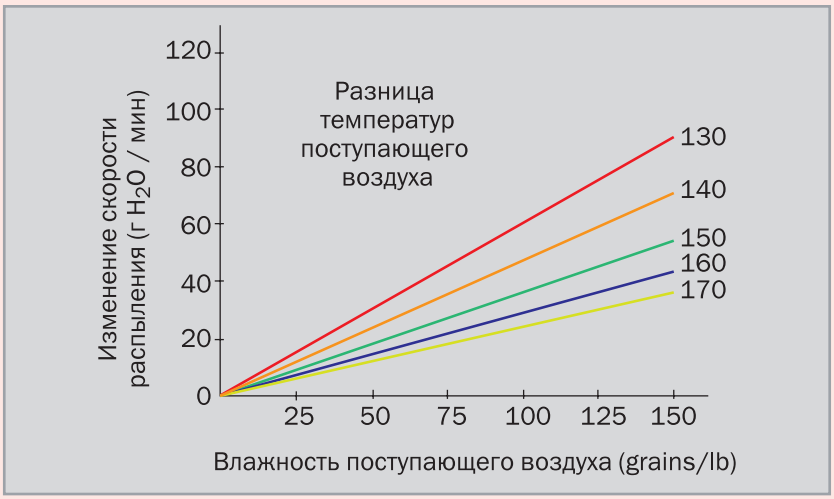

Рис. 6. Величина компенсации скорости распыления как функция влажности
Скорость воздушного потока = 2 000 куб. футов / мин
Скорость распыления = 300 г H_2O / мин

продукта и покрытия хорошее качество последнего может быть достигнуто при температуре воздуха на входе 149 °F (65 °C), скорости воздушного потока 2 000 кубических футов в минуту, уровне влажности 25 grains/lbm и скорости распыления 400 г/мин при использовании раствора с содержанием 10 % твердых частиц. Модель EE, представленную в данной статье, можно использовать для определения того, как температура входящего воздуха должна быть настроена для достижения такого же качества покрытия при уровне влажности 125 grains/lbm.

Применяя уравнение первого закона термодинамики, можно выявить, что температура выходящего воздуха составляет 122 °F (50 °C), а температура поступающего воздуха на влажном градуснике 77 °F. Параметры переноса массы имеют следующие значения:

$p_H = 0{,}4597\ lbf/sq\ in. = 66{,}20\ lbf/sq\ ft$
$P_\infty = 0{,}0867\ lbf/sq\ in. = 12{,}48\ lbf/sq\ ft$
$M = 18/mole$
$R = 1545\ lbf\text{-}ft/lbm\text{-}mole\text{-}^\circ R$
$T_A = 537\ ^\circ R$
$T_\infty = 609\ ^\circ R.$

Параметры теплопереноса (значение плотности воздушного потока) рассчитываются исходя из средних температур воздуха на входе / выходе:

$\rho = 0{,}0665\ lbm/cu\ ft$
$C_p = 0{,}24\ Btu/lbm\text{-}^\circ F$
$h_{FG} = h_{A2} - h_{LIQ} = 1076\ Btu/lbm$
$T_B = 582\ ^\circ R$
$T_\infty = 609\ ^\circ R.$

Используя данные значения в уравнении теплопереноса и переноса массы, получаем значение фактора EE 2990. Это показывает, что если влажность воздуха на входе изменяется с 25 grains/lbm до 125 grains/lbm, то температура воздуха на входе должна быть повышена до 160 °F для достижения того же значения фактора EE. Соответственно, для компенсации уровней влажности внешней среды летом и зимой для данного процесса температура входящего воздуха должна быть повышена до 11 °F.

Выводы

Кривая процесса на рис. 4 показывает, как различный уровень влажности воздуха на входе может быть причиной изменений температуры воздуха на входе. Температура каждой кривой относится к условиям нанесения покрытия, которые используют идеально осушенный воздух при данной температуре. Для уровня влажности выше нуля значение коррекционной температуры находится на вертикальной шкале и добавляется к исходной температуре для определения действительной температуры воздуха на входе, которая должна быть использована при определенном наборе условий.

Влажность также может варьироваться либо увеличением скорости входящего потока воздуха, либо уменьшением скорости подачи раствора, как показано на рис. 5, 6. Кривые на данных графиках сгенерированы при условии удержания фактора EE на одном уровне.

Способность предсказать течение процесса нанесения покрытия на таблетки при различных условиях окружающей среды может быть очень полезна для тех, кто работает в фармацевтической промышленности и занимается научными исследованиями. Эта способность позволяет перенести на бумагу результаты, требуемые для оптимизации процесса или перехода с лабораторного оборудования к производственному, при этом сберегая время и материалы.

Как любой другой метод исследования для разработки процесса, математическая модель нанесения пленочного покрытия на водной основе, представленная в данной статье, может помочь улучшить качество производства при использовании самых экономичных решений. ■

Библиография

1. G. J. Van Wylen. Fundamentals of Classical Thermodynamics (John Wiley and Sons, NewYork, 1978), pp. 433–442
2. J. P. Holman, Heat Transfer (McGrow-Hill, New York, 1972), pp. 363–367
3. R. M. Franz, G. W. Doonan, «Measuring the Surface temperature of Tablet Beds Using Infrared Thermometry», Pharm. Technol. 7(3), 54–67 (1983)
4. «Mass Transfer», ASHRAE Handbook – Fundamentals (American Society of Heating, Refridgerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, 1981) p. 310

Thomas
ROLSTECH