

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ**

Методические указания

Составители: А.А. Липин
А.Г. Липин

Иваново 2017

УДК 66.021.3

Составители: А.А. Липин, А.Г. Липин

Исследование кинетики процесса сушки при различных способах подвода теплоты: методические указания / сост.: А.А. Липин, А.Г. Липин; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2017. – с. 24.

В методических указаниях рассмотрены основные положения теории кинетики сушки, вопросы влияния различных факторов на скорость данного процесса. Приведено описание лабораторной установки для изучения кинетики сушки при различных способах подвода теплоты и дополняющей её программы автоматического сбора, регистрации, обработки и отображения экспериментальных данных. Изложена методика выполнения лабораторной работы и обработки опытных данных.

Предназначены студентам всех направлений подготовки ИГХТУ дневного и заочного отделений, выполняющим лабораторный практикум по дисциплинам «Процессы и аппараты химической технологии», «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», «Процессы и аппараты биотехнологии», «Процессы и аппараты пищевых производств», «Процессы и аппараты отрасли», «Массообменные процессы и аппараты».

Табл. 3. Ил. 11. Библиогр.: 3 назв.

Рецензент

кандидат технических наук А.А. Ильин (ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»)

Оглавление

Введение.....	4
Кинетика процесса сушки.....	5
Конвективная сушка.....	11
Терморadiационная сушка.....	12
Сушка в поле токов высокой и сверхвысокой частоты.....	13
Цель работы.....	16
Описание экспериментальной установки.....	16
Описание программы лабораторной работы «Сушка».....	21
Порядок выполнения работы.....	24
Обработка опытных данных.....	26
Контрольные вопросы.....	28
Список литературы.....	29

ВВЕДЕНИЕ

Сушка – это процесс удаления влаги из твердых материалов путем ее испарения под действием тепловой обработки. При сушке влага переходит из твердой фазы в газовую или паровую. Необходимость удаления влаги из материала может быть обусловлена разными причинами:

- влажный продукт портится при хранении, так как влага вредно воздействует на его товарные свойства: слеживание, смерзание, образование плесени;

- влажность продуктов может быть вредна на некоторых стадиях переработки: действовать как каталитический яд, ухудшать их качество;

- перевозки высушенного материала потребителю, особенно на дальние расстояния, обходятся дешевле, чем влажного – более тяжёлого.

Сушке могут подвергаться твердые материалы, в том числе кристаллические, эластичные и хрупкие гели, коллоидно-дисперсные и капиллярно-пористые тела и жидкости – коллоидные растворы и растворы кристаллоидов.

По способу подвода тепла к высушиваемому материалу различают следующие виды сушки:

- конвективная – путем непосредственного соприкосновения высушиваемого материала с сушильным агентом, в качестве которого обычно используют нагретый воздух или топочные газы (как правило, в смеси с воздухом);

- контактная – путем передачи тепла от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;

- терморadiационная – путем передачи тепла инфракрасными лучами;

- диэлектрическая – путем нагревания в поле токов высокой и сверхвысокой частоты (СВЧ сушка);

- сублимационная – сушка в замороженном состоянии при глубоком вакууме;

- комбинированная.

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА СУШКИ

Под кинетикой процесса сушки понимают изменение средних по объему высушиваемого тела влажности и температуры с течением времени. Кинетика сушки влажного материала определяет выбор оптимальных параметров сушильного агента (температуры, давления, влажности), конструкцию и основные размеры сушильного устройства. Детальное изучение кинетики позволяет организовать процесс сушки с наименьшими энергозатратами и получать продукт высокого качества.

Поскольку сушка является типичным тепло- и массообменным процессом, то ее кинетика будет определяться, в первую очередь, формой связи влаги с материалом. В зависимости от величины энергии связи влаги (воды) с сухим веществом материала различают (по классификации П.А. Ребиндера) следующие формы:

1. Химическая (ионная и молекулярная) связь. Вода в этом случае входит в состав молекулы данного химического соединения в строго определенных стехиометрических соотношениях (вода кислот, оснований, кристаллогидратов). Химически связанная вода может быть выделена из молекулы соединения при помощи химической реакции или прокаливания. В процессе сушки она не удаляется.

2. Физико-химическая (адсорбционная и осмотическая) связь включает влагу, поглощенную в виде пара из окружающей газовой среды и удерживаемую на поверхности вещества под действием ее молекулярного силового поля (адсорбированная вода), а также влагу, входящую в состав растительных и животных клеток (осмотическая).

3. Физико-механически связанная вода представляет собой жидкость, захваченную при образовании структуры геля, находящуюся в порах и макрокапиллярах материала, а также влагу смачивания, обусловленную прилипанием воды при непосредственном соприкосновении ее с поверхностью тела.

К макрокапиллярам относятся такие, которые не обладают капиллярными свойствами, в них не наблюдается изменения давления пара по сравнению с его значением для свободной жидкости. Считается, что радиус макрокапилляра $R > 10^{-5}$ см.

Физико-механически связанная влага называется свободной и может быть удалена даже механическим путем.

Необходимо отметить, что резкой границы между отдельными видами связи влаги с телом не существует: одна форма связи постепенно уменьшается за счет преобладания другой. При исследовании процесса сушки имеют дело с физико-химической и физико-механической формами связи влаги с материалом.

Количественно содержание влаги в материале оценивается его влажностью. Различают относительную влажность (ω), т.е. массу влаги, содержащуюся в материале (W , кг), отнесенную к общей массе образца (m , кг),

$$\omega = \frac{W}{m} = \frac{W}{m_{ac} + W} \quad (1)$$

и абсолютную влажность (ω^c), определяемую по отношению к 1 кг абсолютно сухого вещества в исследуемом материале (m_{ac} , кг),

$$\omega^c = \frac{W}{m_{ac}}. \quad (2)$$

И относительная и абсолютная влажности выражаются в долях единицы или в процентах. При анализе процесса сушки удобнее пользоваться абсолютной влажностью, т.к. количество абсолютно сухого вещества в образце при любых условиях остается постоянным.

При расчете влажности по формулам (1) и (2) получается ее среднее значение в данном материале. Значение относительной ω и абсолютной ω^c влажностей связаны следующими зависимостями:

$$\omega^c = \omega / (1 - \omega), \quad (3)$$

$$\omega = \omega^c / (1 + \omega^c). \quad (4)$$

При исследовании кинетики сушки необходимо установить влияние на скорость протекания процесса различных внешних и внутренних факторов. Скорость сушки определяется уменьшением влажности $d\omega^c$ за некоторый бесконечно малый отрезок времени $d\tau$, т.е.

$$v = \frac{d\omega^c}{d\tau} \quad (5)$$

или для конечных отрезков времени скорость сушки определяется количеством влаги (ΔW), удаленной по отношению к 1 кг абсолютно сухого вещества материала (m_{ac}) в единицу времени ($\Delta\tau$), и средняя скорость в данном случае будет равна

$$v_{cp} = \frac{\Delta W}{m_{ac} \Delta\tau} = \frac{\Delta\omega^c}{\Delta\tau}. \quad (6)$$

Следует отличать скорость сушки от интенсивности сушки, которая определяет массу влаги (dW), удаленную с единицы поверхности материала (F) за единицу времени ($d\tau$). При анализе процесса удобнее пользоваться понятием скорости сушки, т.к. истинную поверхность материала зачастую определить очень трудно. Кроме того, в процессе высушивания она может изменяться (уменьшаться) для материалов, дающих усадку.

Механизм переноса вещества внутри твердой фазы сложен, так как часть влаги испаряется внутри материала и перемещение ее к поверхности происходит в виде жидкости и пара одновременно за счет действия различных сил. Для жидкой фазы это капиллярные, осмотические, гравитационные, термокапиллярные и др. силы, а для паровой фазы – молярный перенос, молекулярная диффузия, бародиффузия, термодиффузия. Удельный вес потоков фаз и действующих сил зависит от большого числа факторов, включающих в себя как внутренние, связанные со структурой высушиваемого тела, так и внешние параметры процесса и свойства сушильного агента. Кроме того, соотношение потоков и сил меняется с протеканием процесса. Все это создает сложную картину переноса, не поддающуюся аналитическому расчету,

основанному на количественном анализе составляющих ее процессов переноса влаги.

Кинетика сушки влажного материала обычно исследуется экспериментально путем нахождения следующих зависимостей: температуры прогрева высушиваемого материала от времени процесса $t=f_1(\tau)$, абсолютной влажности высушиваемого материала от времени процесса $\omega^c=f_2(\tau)$ (кривая сушки), скорости сушки от абсолютной влажности материала $v=f_3(\tau)$ (кривая скорости сушки). Во всех этих зависимостях легко установить наличие трех этапов протекания процесса.

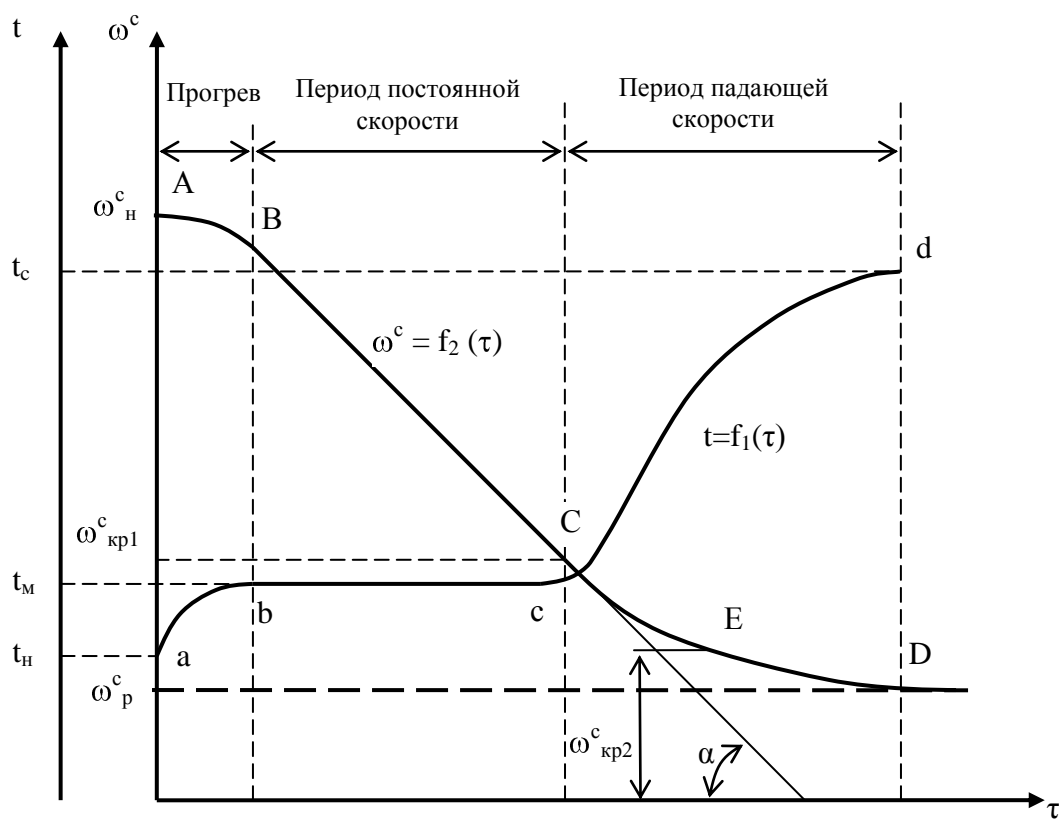


Рис.1. Кривые сушки и прогрева высушиваемого материала

На температурной кривой (рис. 1) вначале наблюдается прогрев материала от температуры, с которой он вносится в сушилку (t_n), до температуры мокрого термометра (t_m), отвечающей температуре и влажности сушильного агента, поступающего в сушилку (участок ab). Затем температура

материала остается постоянной, равной температуре мокрого термометра, до тех пор, пока не удалится вся свободная влага (участок bc). После этого происходит постепенное повышение температуры материала, и в конце процесса сушки она может сравняться с температурой сушильного агента, находящегося в контакте с сухим материалом (участок cd).

В период прогрева материала наблюдается сравнительно медленное удаление влаги (участок АВ на кривой сушки $\omega^c = f_2(\tau)$). Затем условно выделяют прямолинейный участок ВС, который называется первым периодом сушки. Он соответствует удалению свободной влаги, покрывающей поверхность материала. После чего начинается удаление связанной влаги (участок CD) – второй период сушки. Точка С, разделяющая первый и второй периоды сушки, называется критической точкой, а влажность материала, соответствующая ей, – первой критической влажностью. Конечная влажность материала (точка D) характеризует его равновесную влажность (ω_p) при данных условиях сушки.

По кривым сушки строятся кривые скорости сушки, представляющие собой графическое выражение функции $v=f_3(\tau)$ или скорости сушки от абсолютной влажности образца (рис. 2). Скорость сушки определяется по кривой сушки путем графического дифференцирования как тангенс угла наклона касательной, проведенной к кривой сушки в данной точке, к оси абсцисс (угол α на рис. 1).

На кривой скорости сушки различаются те же периоды, что и на кривых сушки и температуры материала. Начальный участок кривой АВ, соответствующий увеличению скорости сушки, отвечает прогреву материала при помещении его в сушилку. За ним следует горизонтальный отрезок ВС – период постоянной скорости сушки, которая в данном периоде лимитируется скоростью внешней диффузии (массоотдачи) влаги, т.е. ее перехода с поверхности испарения в окружающую среду. Скорость сушки в данном

периоде будет зависеть от температуры и влажности сушильного агента, общего давления в сушилке и гидродинамики процесса.

В первой критической точке С удаляется механически связанная влага и наступает второй период (отрезок ВС на рис. 2) падающей скорости сушки. Для него характерно изменение давления водяного пара над поверхностью образца в зависимости от влажности материала, т.е. $P_m = f(\omega^c)$, что сказывается на уменьшении величины движущей силы процесса $\Delta P = P_m - P_n$, ведущем к снижению его скорости.

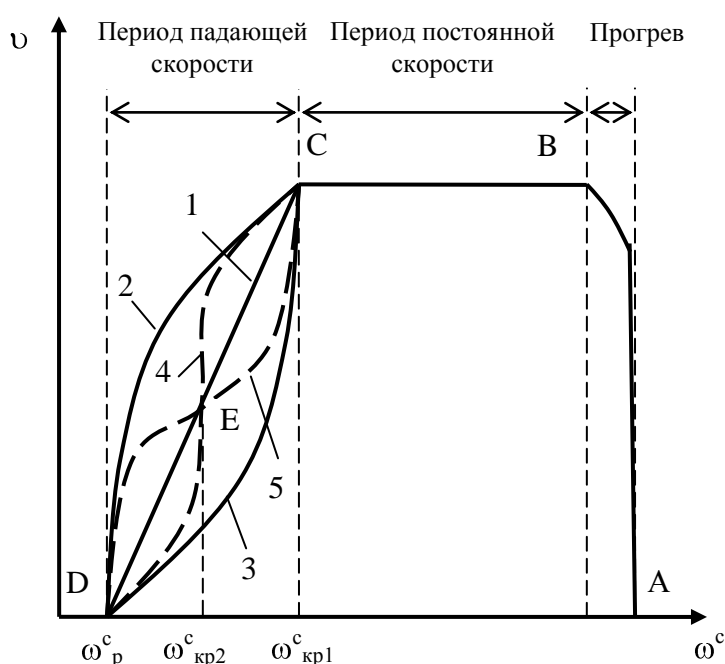


Рис. 2. Кривая скорости сушки $v = f(\omega^c)$

Кривые скорости сушки в период падающей скорости могут быть различной конфигурации (линии 1–5 на рис. 2), по их виду можно судить о форме связи влаги с материалом. Так, линия 1 является прямой, она характерна для тонких пористых материалов (бумага, тонкий картон, ткань и т.д.). Линия типа 2 соответствует сушке коллоидных тел, а линия типа 3 – пористых керамических материалов. Все эти линии имеют одну критическую точку С. Материалам, имеющим более сложную структуру, присущи более сложные кривые скорости сушки. Кривая 4 характерна для сушки глины, а кривая 5 –

сухарей. На этих кривых наблюдается вторая критическая точка E, которой соответствует вторая критическая влажность ($\omega_{кр2}$). По мере удаления внутренней влаги материала давление водяного пара над его поверхностью уменьшается, приближаясь в пределе к величине парциального давления паров воды в сушильном агенте P_n . Следовательно, движущая сила процесса сушки уменьшается, приближаясь к нулю ($\Delta P = P_n - P_n \rightarrow 0$), и скорость процесса асимптотически приближается к нулю.

Момент времени, когда давление пара над поверхностью материала будет равно парциальному давлению паров воды в окружающей среде, соответствует установлению динамического равновесия воды в материале с влажностью сушильного агента, движущая сила процесса становится равной нулю, и сушка заканчивается (т. D, рис. 1, 2). Влажность материала, соответствующая т. D, называется, равновесной (ω_p). Поскольку она отвечает равенству $P_m = P_n$ $P_m - P_n = 0$, то на величину равновесной влажности будут воздействовать факторы, влияющие на значения P_m или P_n . К ним относятся: форма связи влаги с материалом, общее давление в сушилке, влажность и температура сушильного агента.

Кривые сушки, скорости сушки и прогрева материала имеют большое практическое значение. Они позволяют установить время сушки, оценить формы связи влаги с материалом, выбрать оптимальный вариант и режим сушки. Они используются при проектировании и расчете промышленных сушилок.

КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА

В конвективных сушилках подвод тепла к высушиваемому материалу осуществляется путем конвективного теплообмена с сушильным агентом, который предварительно нагревается в специальных устройствах (калориферах). Сушильным агентом может быть воздух, инертный газ или топочные газы. Особенности работы конвективной сушилки оказывают

существенное влияние на скорость процесса в первом периоде сушки, когда она определяется скоростями подвода теплоты и внешней диффузией влаги.

Коэффициенты тепло- и массоотдачи определяются в данном случае гидродинамической обстановкой в аппарате (скоростью сушильного агента, направлением его движения относительно поверхности испарения, формой, размерами и компоновкой этой поверхности). Так, большой эффект дает применение локального обдува материала. В этом случае сушильный агент подается с большой скоростью по нормали к поверхности нагрева из специальных сопел или щелей.

Некоторым недостатком конвективных сушилок является сравнительно небольшая величина удельного теплового потока к поверхности испарения материала, объясняемая небольшими значениями коэффициентов теплоотдачи от газовой фазы.

ТЕРМОРАДИАЦИОННАЯ СУШКА

Сушка влажных материалов при подводе теплоты к поверхности испарения в виде потока лучистой энергии называется терморadiационной или сушкой инфракрасными лучами. Генераторами излучения могут являться обычные лампы накаливания, как правило, снабженные рефлекторами. Промышленностью выпускаются также специальные лампы инфракрасного излучения. Применяются электрические элементы сопротивления, беспламенные керамические горелки, а также трубчатые или плоские излучатели, обогреваемые высокотемпературными теплоносителями или дымовыми газами. Основным достоинством данного вида сушки является возможность создания высоких удельных тепловых потоков (до 26 кДж/м^2 по сравнению с 7 кДж/м^2 для конвективной сушки). Величина теплового потока легко регулируется путем изменения напряжения на лампах, изменением расстояния от поверхности испарения до источника излучения, введением прерывистого излучения. Применение радиационной сушки исключает возможность загрязнения высушиваемого продукта.

Основной особенностью радиационной сушки является возникновение больших температурных градиентов по толщине высушиваемого материала, что сказывается на механизме удаления влаги и, соответственно, на скорости процесса. Поток лучистой энергии, подводимой к поверхности образца, поглощается ею. Причем возможность проникновения инфракрасных лучей вглубь материала (проницаемость) возрастает с уменьшением длины волны. Глубина проникновения лучистого потока определяется размерами и формой пор и капилляров и колеблется от 0,1 до 2 мм. От поверхностного слоя теплота отводится внутрь материала путем теплопроводности, величина которой для диэлектриков мала, поэтому имеют место высокие градиенты температуры.

Возникающий температурный градиент оказывает существенное влияние на перемещение влаги внутри образца. Экспериментально установлено, что под его действием наблюдается перемещение воды по направлению теплового потока, т.е. в сторону уменьшения температуры. Для уменьшения градиента температуры часто применяют облучение материала (2–4 с), чередующееся с длительными перерывами (20–30 с), в течение которых происходит выравнивание температур по толщине образца.

Количество поглощенного материалом тепла определяется также состоянием его поверхности, степени черноты, пористостью, шероховатостью и т.д.

СУШКА В ПОЛЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ И СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Рассматриваемый метод сушки основан на нагревании высушиваемых материалов, обладающих диэлектрическими свойствами, в электрическом поле высокой или сверхвысокой частоты.

Использование для нагревания токов высокой частоты (от 10 до 100 МГц) и сверхвысокой частоты (от 100 до 300 МГц) обусловлено стремлением устранить применение опасных высоких напряжений, так как количество выделяющегося в массе диэлектрика тепла пропорционально квадрату напряжения и частоте тока:

$$q = \frac{5}{9} 10^{-12} \left(\frac{U}{L} \right)^2 n \varepsilon \text{ [Вт/см}^3\text{]},$$

где U — напряжение электрического поля; L — расстояние между электродами; n — частота тока; ε — коэффициент потерь диэлектрика, который в нашем случае можно назвать коэффициентом убыли влаги.

Принцип высокочастотного нагревания заключается в том, что молекулы материала, помещенного в переменное электрическое поле, начинают колебаться с частотой поля и при этом поляризуются. Колебательная энергия частиц затрачивается на преодоление трения между молекулами диэлектрика и превращается в тепло непосредственно в объеме нагреваемого материала. За счет использования тепла диэлектрических потерь достигается весьма равномерное нагревание материала. Напомним, что при конвективной, контактной и терморadiационной сушке тепло подводится к внешней поверхности материала.

Источником СВЧ излучения в современных установках служит магнетрон — специальный электронный прибор, в котором генерирование сверхвысокочастотных колебаний осуществляется модуляцией электронного потока по скорости.

В магнетронах используется движение электронов во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях, создаваемых в кольцевом зазоре между катодом и анодом (рис. 3). Между электродами подается анодное напряжение, создающее радиальное электрическое поле, под действием которого вырываемые из подогретого катода электроны устремляются к аноду. Анодный блок помещается между полюсами электромагнита, который создает в кольцевом зазоре магнитное поле, направленное по оси магнетрона. Под действием магнитного поля электрон отклоняется от радиального направления и движется по сложной спиральной траектории. В пространстве между катодом и анодом образуется вращающееся электронное облако с языками, напоминающее ступицу колеса со спицами. Пролетая мимо щелей объемных резонаторов анода, электроны возбуждают в

них высокочастотные колебания. Электрическое поле концентрируется у щелей, а магнитное поле сосредоточено внутри полости.

Вывод энергии из магнетрона осуществляется при помощи излучателя (антенны), помещаемого в один или чаще два соседних резонатора. По коаксиальному кабелю энергия подводится к нагрузке.

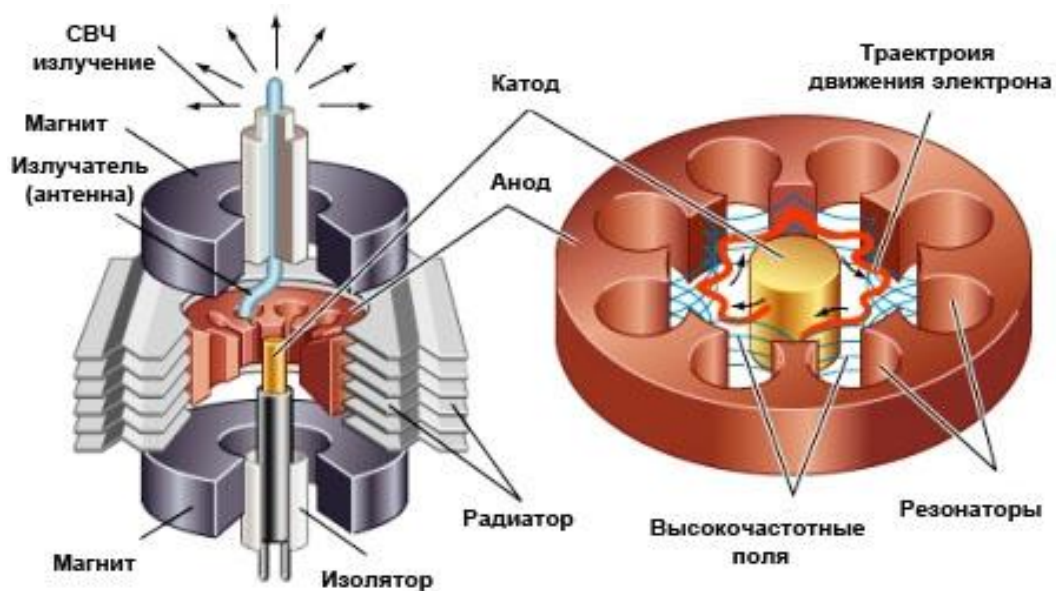


Рис. 3. Устройство и принцип работы магнетрона

Важное преимущество СВЧ нагрева – тепловая безынерционность, т.е. возможность практически мгновенного включения и выключения теплового воздействия на обрабатываемый материал. Отсюда высокая точность регулировки процесса нагрева и его воспроизводимость. Достоинством СВЧ нагрева является также высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую, выделяемую в объеме нагреваемых тел. Тепловые потери в подводящих трактах обычно невелики, и стенки волноводов и рабочих камер остаются практически холодными, что создает комфортные условия для обслуживающего персонала.

Так как ε возрастает с ростом влагосодержания, то больше тепла выделяется в наиболее влажных частях материала и здесь устанавливается более высокая температура. Влагосодержание материала в периферийных слоях вследствие испарения влаги с поверхности всегда меньше, чем в средней

его части. Следовательно, при высокочастотном нагреве в средней части влажного материала устанавливается более высокая температура, чем на его периферии. Благодаря этому температурному градиенту во влажном материале происходит интенсивное перемещение влаги к его поверхности, и скорость сушки во много раз возрастает по сравнению со скоростью сушки другими методами.

Заметим, что интенсивность высокочастотного нагрева зависит от мощности и частоты поля (длины волны); каждый материал быстрее нагревается под действием волн определенной длины. Более того, в случае неравномерной влажности материала можно путем подбора длины волны удалить влагу из мест ее сосредоточения, нагревая только эти места и практически не повышая температуру в остальных местах.

Описанное распределение температуры в куске влажного материала при высокочастотной сушке уменьшает возможность его растрескивания, коробления и образования плотной корки на поверхности. Это, наряду с высокой скоростью протекания процесса, также относится к числу достоинств метода высушивания материалов в поле токов высокой и сверхвысокой частоты.

СВЧ способ широко применяется для сушки пищевых продуктов и древесины.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение механизмов и закономерностей удаления влаги в процессе сушки в зависимости от способов подвода тепла к высушиваемому материалу; определение времени сушки и количества испаряемой влаги; построение кривых сушки и скорости сушки.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из комбинированной сушильной камеры 2 с пятью режимами подвода тепла (рис. 4). Через отверстие в верхней стенке камеры проходит термостойкая нить, на которой подвешена чаша 1 с высушиваемым материалом. Верхний конец нити крепится к нижнему подвесу электронных

цифровых весов 3. В сушильную камеру 2 встроены датчики температуры и влажности, показания которых индицируются на цифровом приборе 8.

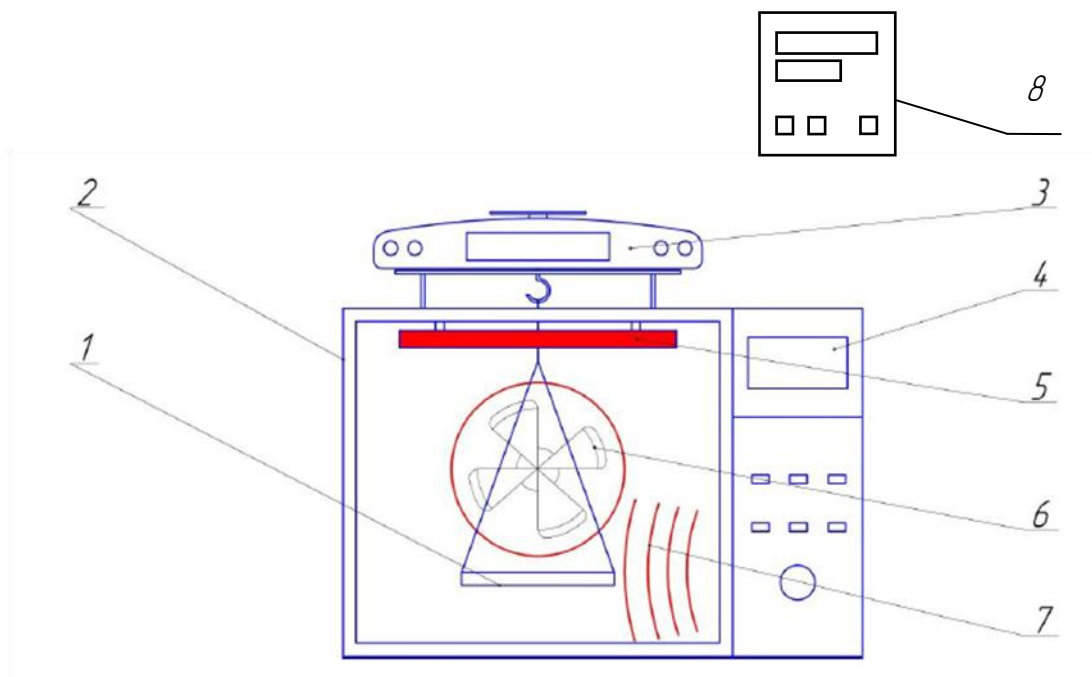


Рис. 4. Схема лабораторной установки: 1 – чаша с высушиваемым материалом; 2 – сушильная камера; 3 – электронные весы; 4 – таймер; 5 – ИК нагреватель; 6 – конвективный нагреватель; 7 – источник СВЧ-излучения; 8 – индикатор температуры и влажности

Установка позволяет осуществлять следующие виды сушки:

- конвективную;
- терморadiационную (ИК);
- СВЧ;
- комбинацию конвективной и СВЧ;
- комбинацию терморadiационной и СВЧ.

Выбор режима сушки осуществляется путем нажатия соответствующих клавиш на панели управления сушильной камерой (рис. 5).


1  Конвекция	2  ИК	3  СВЧ
	4  СВЧ+ИК СВЧ+ Конвекция	
		5  Часы
6 	7  Выбор	8 
9  СТОП/ЭКО	10  +30 сек	11  СТАРТ


Рис. 5. Панель управления сушильной камерой


Клавиши на панели управления выполняют следующие функции:

- 1 – «Конвекция» включает режим конвективной сушки;
- 2 – «ИК» включает режим терморadiационной сушки;
- 3 – «СВЧ» включает режим сушки электромагнитными волнами сверхвысокой частоты;
- 4 – «СВЧ+ИК, СВЧ+Конвекция» включает комбинированные режимы сушки;
- 5 – «Часы» служит для настройки времени;
- 6, 7, 8 – служат для изменения значений и их выбора;
- 9 – включение/выключение сушильной камеры;
- 10 – запускает режим СВЧ сушки на 30 секунд, каждое последующее нажатие увеличивает время сушки ещё на 30 с;
- 11 – служит для запуска выбранного с помощью клавиш 1–4 режима сушки.


Лабораторная установка позволяет задавать температуру сушки (для режимов «Конвекция» и «СВЧ+Конвекция»), мощность СВЧ излучения (для режимов «СВЧ» и «СВЧ+ИК») и время сушки для всех режимов. Рассмотрим каждый режим сушки подробнее.


Режим конвективной сушки. Для выбора этого режима нужно нажать клавишу 1 «Конвекция» на панели управления. На дисплее сушильной камеры отобразится символ  и заданное по умолчанию значение температуры сушки $t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$. При помощи клавиш 6 и 8 можно изменить значение температуры в диапазоне от 40 до 200 $^{\circ}\text{C}$ с шагом 10 $^{\circ}\text{C}$ и затем нажать клавишу 7 «Выбор». Если в течение 5 секунд температура не будет изменена, то установка перейдет в режим выбора времени сушки. Время сушки также устанавливается клавишами 6 и 8. Максимальное значение времени сушки 60 минут. После установки значений температуры и времени необходимо нажать клавишу 11 «Старт».

Режим терморрадиационной сушки. Для выбора данного режима нужно нажать клавишу 2 «ИК» на панели управления. На дисплее сушильной камеры отобразится символ  и меню установки времени сушки. Время сушки устанавливается клавишами 6 и 8, после чего запускают процесс нажатием клавиши 11 «Старт».

Режим СВЧ сушки выбирается нажатием клавиши 3 «СВЧ». На дисплее отобразится символ  и заданное по умолчанию значение мощности СВЧ излучения $N = 900\text{ Вт}$. При помощи клавиш 6–8 можно выбрать уровень мощности СВЧ излучения, доступны следующие значения N , Вт: 100, 180, 300, 450, 600, 900. Далее задается время сушки (аналогично режимам, описанным выше). Если в течение 5 секунд мощность не будет изменена, то установка перейдет в режим выбора времени сушки. После установки значений мощности и времени необходимо нажать клавишу 11 «Старт».

Режим СВЧ сушки можно запустить вторым способом – клавишей 10 «+30 сек». В этом случае нельзя изменить мощность СВЧ излучения, а время задается путём многократного нажатия клавиши 10 и будет кратно 30 с.

Режим комбинированной СВЧ и терморadiационной сушки выбирается клавишей 4 «СВЧ+ИК, СВЧ+Конвекция», при нажатии которой на дисплее появляется надпись Сб–1. Для установки режима СВЧ+ИК нужно нажать клавишу 7 «Выбор». На дисплее отобразится символ  и заданное по умолчанию значение мощности СВЧ излучения N = 600 Вт. При помощи клавиш 6–8 можно выбрать уровень мощности СВЧ излучения: 300, 450, 600 Вт. Далее задается время сушки. Если в течение 5 секунд мощность не будет изменена, то установка перейдет в режим выбора времени сушки. После установки значений мощности и времени необходимо нажать клавишу 11 «Старт».

Режим комбинированной СВЧ и конвективной сушки выбирается клавишей 4 «СВЧ+ИК, СВЧ+Конвекция», при нажатии которой на дисплее появляется надпись Сб–1. Для установки режима СВЧ+Конвекция нужно изменить значение на Сб–2 с помощью клавиш 6 и 8 и затем нажать клавишу 7 «Выбор». На дисплее отобразится символ  и заданное по умолчанию значение мощности СВЧ излучения N = 600 Вт. При помощи клавиш 6–8 можно выбрать уровень мощности СВЧ излучения: 100, 180, 300, 450, 600 Вт. Далее задается температура сушки в диапазоне от 40 до 200 °С с шагом 10 °С. По умолчанию t = 180 °С. Затем задается время сушки. После установки значений мощности, температуры и времени необходимо нажать клавишу 11 «Старт».

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «СУШКА»

Лабораторная установка оснащена компьютерной системой автоматического сбора, регистрации, обработки и отображения экспериментальных данных, которая реализована в виде программы лабораторной работы «Сушка». Её интерфейс представлен на рис. 5.

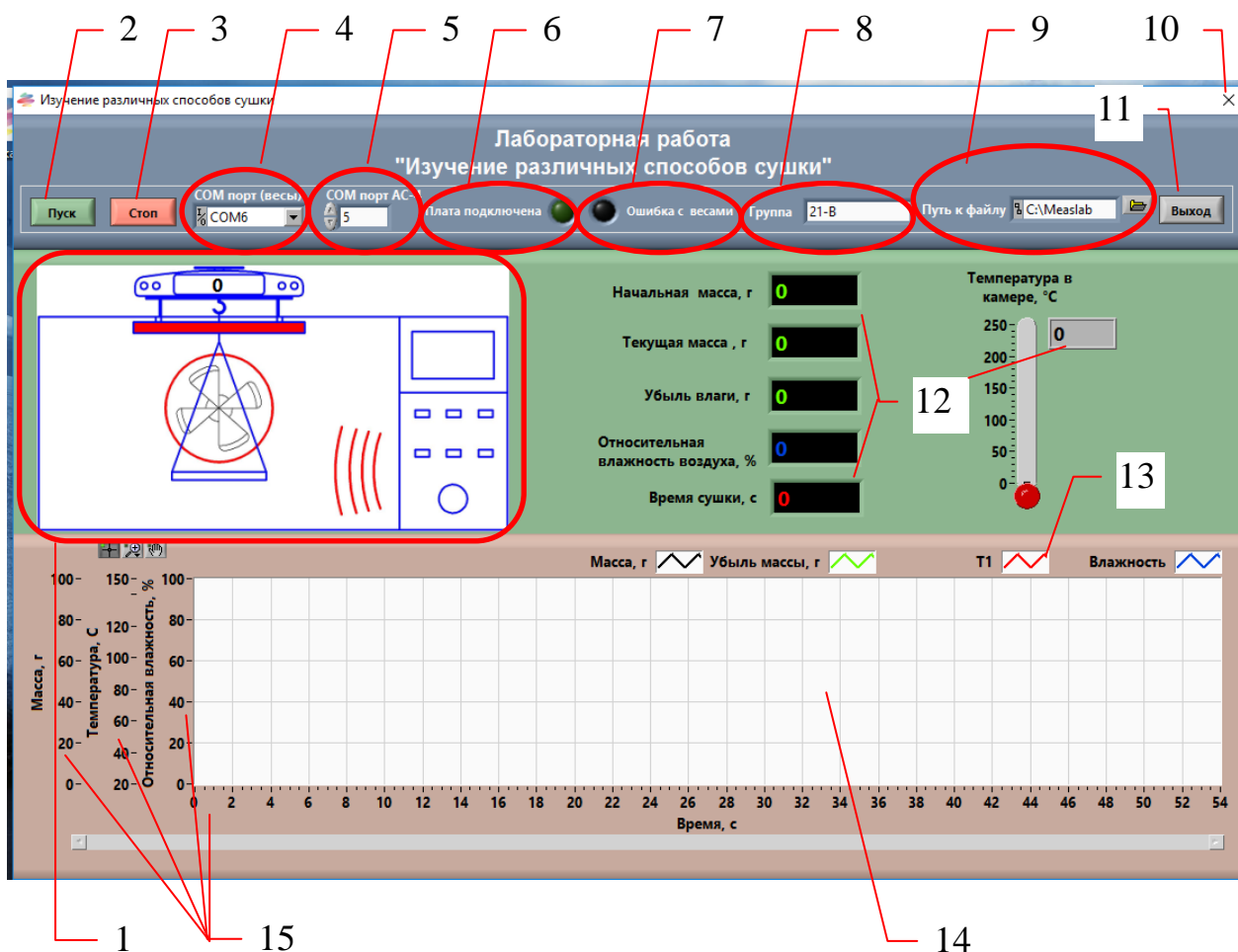


Рис. 6. Интерфейс программы лабораторной работы

Лицевая панель программы включает следующие элементы:

1. Схема лабораторной установки.
2. Кнопка запуска программы сбора данных.
3. Кнопка остановки программы сбора данных.
4. Окно ввода номера COM порта для весов.
5. Окно ввода номера COM порта для лабораторного стенда.
6. Индикатор связи с платой сбора данных. Включается, если плата сбора данных подключена к компьютеру. В случае, когда индикатор не горит,

требуется подключить плату и перезагрузить компьютер и программу.

7. Индикатор связи с платой весов. В нормальном режиме не горит. Включается, если весы не подключены к компьютеру.

8. Текстовое поле ввода группы и имени студента.

9. Текстовое поле указания пути к файлу с результатами эксперимента.

10. Кнопка экстренного выхода из программы.

11. Кнопка штатного выхода из программы.

12. Цифровые индикаторы, отображающие показания датчиков при работе системы.

13. Графическая легенда, отображающая соответствие кривой на графике и измеряемого параметра, а также позволяет изменять привязку графиков к разным шкалам.

14. Многоканальный осциллограф – отображает показания присоединенных датчиков, привязанных к своим шкалам, в реальном режиме времени.

15. Шкалы многоканального осциллографа.

При запуске программы лабораторной работы «Сушка» на экране монитора появляется лицевая панель программы эксперимента. В нижней части экрана помещен осциллограф для регистрации остаточной массы высушиваемого материала и количества испаренной влаги. В правой и верхней части лицевой панели расположены индикаторы, отображающие текущие значения температуры воздуха в рабочем объеме сушильной камеры, массы высушиваемого материала и испаренной влаги.

Запуск системы измерения производится кнопкой «Пуск». Перед началом измерений до нажатия на кнопку «Пуск» требуется ввести номера СОМ портов для весов и лабораторного стенда, номер группы и указать путь к файлу с результатами эксперимента. После окончания эксперимента необходимо завершить процесс сбора данных путем нажатия кнопки «Стоп» и только после этого можно выйти из программы, нажав кнопку «Выход».

Получение номера СОМ-порта. Для работы компьютерной системы автоматического сбора, регистрации, обработки и отображения

экспериментальных данных необходимо получить номера COM-портов, через которые подключены весы и лабораторный стенд к компьютеру. Для получения номера COM-порта необходимо зайти в диспетчер устройств на компьютере. Для этого правой кнопкой мыши нужно нажать на ярлык «Компьютер» на рабочем столе или в меню «Пуск». В выпадающем меню следует выбрать вкладку «Управление». В открывшемся окне в левом боковом меню необходимо выбрать «Диспетчер устройств». В списке устройств нужно выбрать «Порты (COM и LPT)». В этом разделе списка должны отображаться две строки (рис. 7): «Silicon Labs CP 210x USB to UART Bridge (COM X)» и «USB Serial Port (COM Y)». COM X – порт лабораторного стенда, COM Y – порт весов. Номера COM портов X, Y нужно указать в соответствующем окне программы «Сушка».

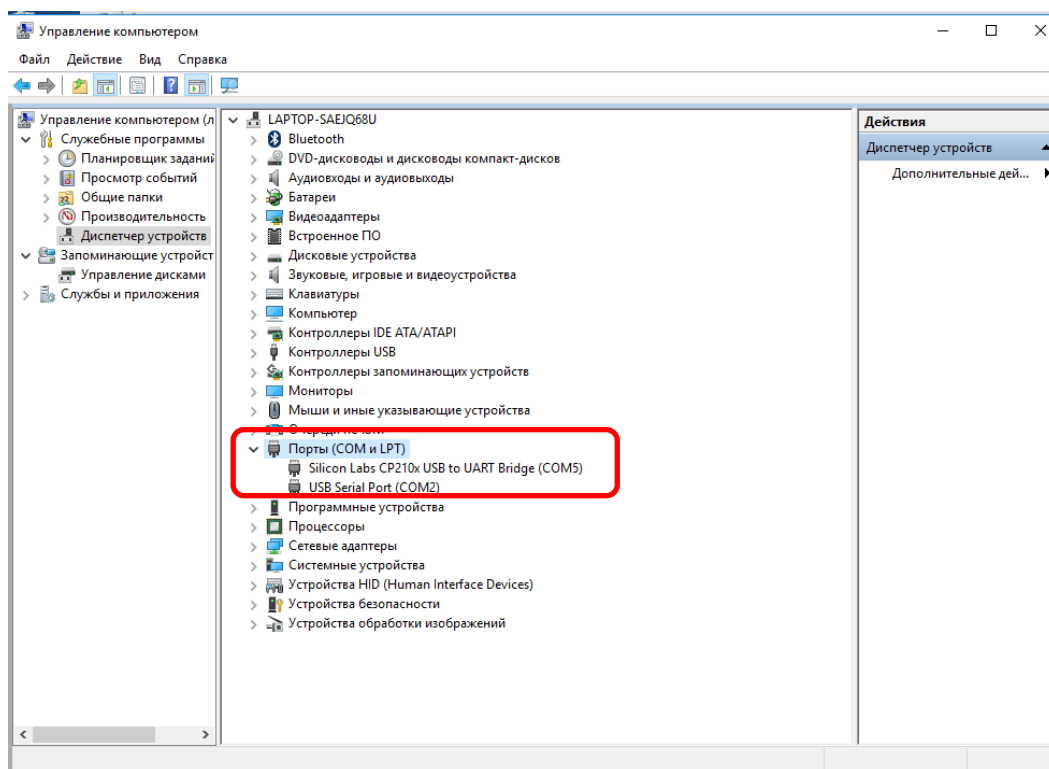


Рис. 7. Диспетчер устройств при подключении лабораторного стенда и весов

Изменение пределов по осям. В процессе сбора данных может потребоваться изменение граничных пределов по шкалам X и Y, это можно сделать следующим образом: для шкалы X – подвести курсор мыши к крайней

метке, установить курсор, стереть предыдущее число, записать новое значение и нажать на клавиатуре Enter (рис. 8). Для изменения предела по оси Y, требуется указать в блоке установки пределов измерения по оси Y требуемые пределы для данного датчика.

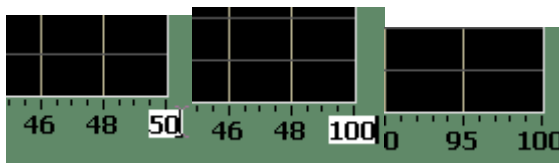


Рис. 8. Изменение предела по оси X

Изменение стиля кривых на графиках. В программе допускается выбор цвета, толщины и стиля кривых, отображаемых на цифровом многоканальном осциллографе. Для изменения данных параметров в окне программы необходимо нажать правой кнопкой мыши на легенду графика, вид которого необходимо изменить. В выпадающем меню (рис. 9) можно изменить цвет (color), толщину (line width) и стиль кривых (line style).

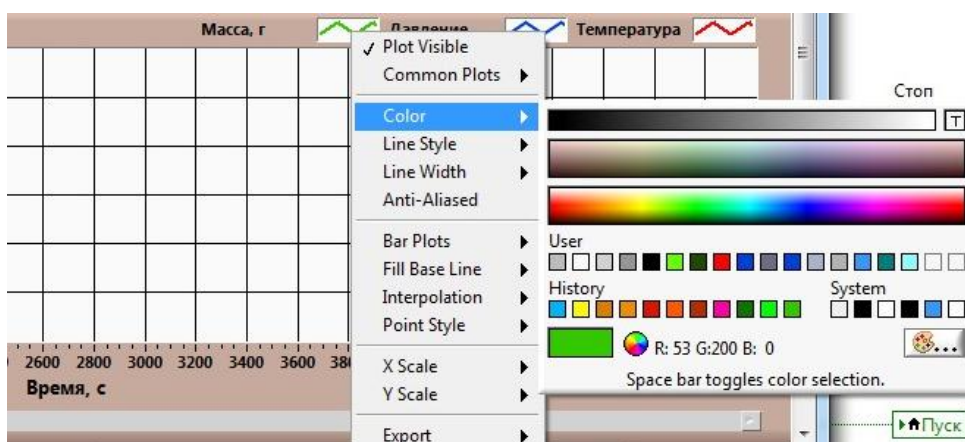


Рис. 9. Выпадающее меню свойств графика

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить лабораторный стенд и электронные весы к USB портам компьютера.
2. Включить компьютер.
3. Включить весы нажатием кнопки «On» на весах и дождаться стабилизации. Если стабилизации нет, то требуется дождаться пока перестанет

качаться платформа и снова запустить весы.

4. Включить лабораторный стенд тумблером «Сеть 220 В».

5. Подключить электронные весы к сети питания нажатием кнопки «ВК1» на стенде.

6. Взвесить сухой образец материала. Записать его массу в лабораторный журнал.

7. Поместить образец материала в сушильную камеру.

8. Запустить программу проведения лабораторной работы «Сушка». Ярлык программы находится на рабочем столе компьютера.

9. Ввести номера COM портов весов и лабораторного стенда в соответствующие поля программы. Процесс определения номера COM порта описан выше в разделе «Получение номера COM порта».

10. Запустить процесс измерений нажатием кнопки «Пуск» на лицевой панели программы «Сушка».

11. Установить режим сушки, запустить сушильную камеру. Выбор режима и его параметров описан выше в разделе «Описание лабораторной установки». В автоматизированной лабораторной установке измерение и регистрация текущих значений массы высушиваемого материала осуществляется непрерывно. Одновременно вычисляется убыль влаги по времени, осуществляется пересчет абсолютных значений в относительные, формируются соответствующие массивы данных.

12. Занести показатели режима в сводную таблицу 1. С началом рабочего режима наблюдать за изменением массы высушиваемого материала и убыли влаги на компьютере и цифровом индикаторе. Обратит внимание на характерные участки изменения массы.

13. При установлении равновесной влажности, когда изменение текущей массы становится меньше 0,1 г за цикл измерений, выключить сушильную камеру и записать время сушки и данные цифровых индикаторов в таблицу 1.

14. Открыть камеру и через 2-3 минуты осторожно извлечь высушенный образец. Визуально оценить качество сушки.

15. Повторить эксперимент при других режимах сушки (пункты 6–14).

16. Построить в лабораторном журнале таблицу 2 и перенести в неё экспериментальные данные из файла, сформированного системой за время эксперимента. Файл с опытными данными сохраняется в компьютер в папку C:\Measlab и имеет имя: Сушка_Группа_дд_мм_ггггТчч_мм.xlsx.

Например: Сушка_3-30_18_01_2017Т11_23.xlsx.

17. Построить и проанализировать графики сушки и скорости сушки.

Таблица 1. Основные показатели исследуемых режимов сушки

№ п/п	Способ сушки	Начальная масса влажного образца, г	Масса образца в конце сушки, г	Убыль влаги, %	Время сушки, мин
1	Конвективная				
2	Терморadiационная				
3	СВЧ				
4	СВЧ+ИК				
5	СВЧ+Конвекция				

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные данные

№ п/п	Способ сушки	Масса сухого образца, m_{ac} , Г	Текущая масса образца, m , г	Время сушки τ , с	Температура, t °С	Влагосодержание, ω^c , кг влаги/кг а.с.в

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Находится текущее значение влагосодержания материала:

$$\omega^c = \frac{m - m_{ac}}{m_{ac}}, \quad (7)$$

где m_{ac} – масса сухого образца; m – текущая масса образца.

Полученные значения сводятся в табл. 2.

2. По полученным значениям влагосодержания строится кривая сушки. На этот же график наносится температурная кривая.

3. Определяются значения средней скорости сушки для ряда интервалов изменения влагосодержания:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta \omega^c}{\Delta \tau}. \quad (8)$$

Изменение влагосодержания и промежутков времени, за который оно произошло, следует брать со сглаженной кривой сушки (рис. 10), а не из таблицы опытных данных. Так, на кривой сушки нужно выделить в один интервал период прогрева $\Delta \tau_1$, период постоянной скорости сушки $\Delta \tau_2$, а период падающей скорости разбить на несколько равных интервалов (например, $\Delta \tau_3 - \Delta \tau_7$). Для каждого временного интервала определяются начальное и конечное значение влагосодержания материала.

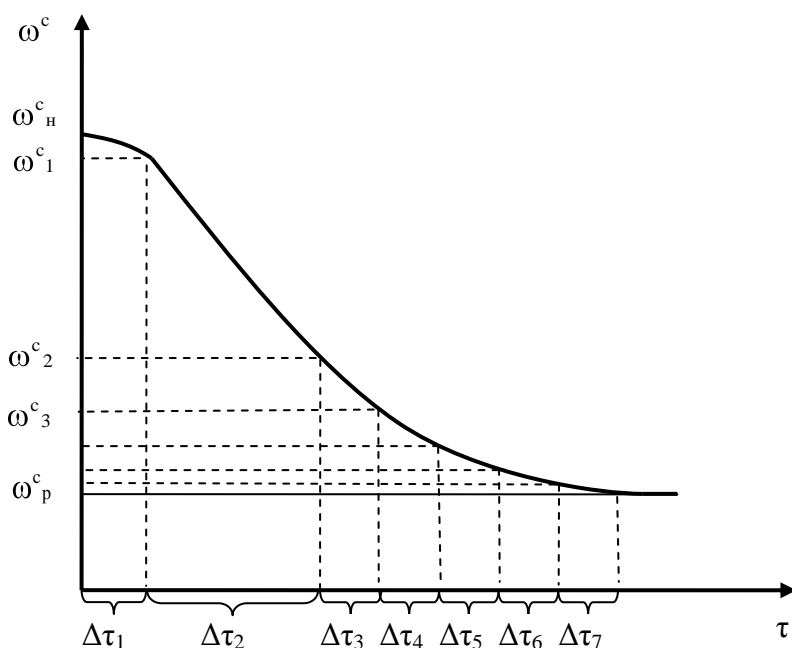


Рис. 10. Кривая сушки

По формуле (8) для полученных интервалов находим среднюю скорость:

$$v_1 = \frac{\omega^c_n - \omega^c_1}{\Delta \tau_1}; v_2 = \frac{\omega^c_1 - \omega^c_2}{\Delta \tau_2}; v_3 = \frac{\omega^c_2 - \omega^c_3}{\Delta \tau_3}; \dots; v_7 = \frac{\omega^c_6 - \omega^c_p}{\Delta \tau_7}.$$

Полученные значения скорости сушки сводятся в табл. 3.

Таблица 3. К построению кривой скорости сушки

№ п/п	Временной интервал Δt , с	Изменение влагосодержания $\Delta \omega^c$, кг/кг	Среднее значение влагосодержания, ω^c_{cp} , кг/кг	Средняя скорость сушки v_{cp} , кг/(кг·с)

4. По данным таблицы 3 строится кривая скорости сушки. Пример построения приведен на рис. 11. В первом периоде сушки скорость постоянна, поэтому в интервале от ω^c_1 до ω^c_2 строится прямая линия. Для остальных интервалов значение средней скорости соответствует влагосодержанию в середине соответствующего интервала.

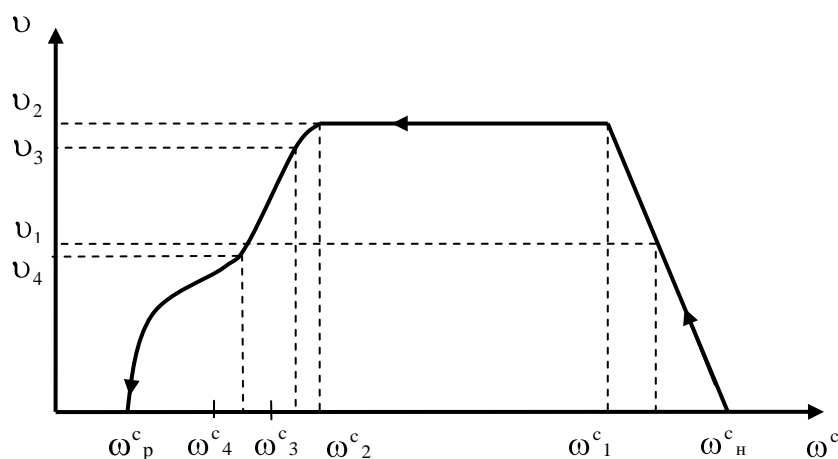


Рис. 11. Построение кривой скорости сушки

5. На основании построенных кривых сушки и скорости сушки делают выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сушка. Физическая сущность процесса. Способы тепловой сушки.
2. Формы связи влаги с материалом.
3. Способы количественной оценки влагосодержания материала.
4. Движущая сила процесса сушки.

5. Материальный баланс конвективной сушилки.
6. Тепловой баланс конвективной сушилки.
7. Основные параметры влажного воздуха.
8. Кинетика сушки влажных материалов. Кривая сушки и температурная кривая. Их анализ.
9. Скорость сушки. Кривая скорости сушки. Периоды процесса сушки.
10. Относительная и абсолютная влажности материала. Гигроскопическая и равновесная влажности.
11. Обобщенное критериальное уравнение массоотдачи в процессе конвективной сушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. В 2 кн. Кн.2 : учебник для вузов / [В.Г. Айнштейн и др.]; под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Логос; Высш. шк., 2002. – 912 с.
2. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 кн. Кн.2. Массообменные процессы и аппараты: учебник для вузов / Ю.И. Дытнерский. – 2-е изд. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
3. Сажин, Б.С. Основы техники сушки: учебник / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.