

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОДУКТА В ВАКУУМЕ

В. А. Еськов^{1,2}, А. Н. Пахомов¹✉

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), ranpost@yandex.ru; АО «Росхимзащита» (2),
Тамбов, Россия*

Ключевые слова: вакуум; весы; датчик угла поворота; кинетика сушки; регенеративный продукт; сушка; тензодатчик.

Аннотация: Рассмотрены возможности применения в вакуумной сушильной камере стандартных лабораторных электронных весов, весов, построенных на основе системы тензодатчиков и модернизированных механических весов. Показано, что стандартные лабораторные электронные весы и специализированные весы на тензодатчиках не позволяют получить корректные данные по убыли веса при сушке регенеративного продукта в вакууме. Разработана конструкция механических весов, исключающих влияние вакуумирования и нагрева сушильной камеры, позволяющих производить измерения веса высушиваемых образцов в диапазоне 1...5 кг с чувствительностью до 1 г.

Введение

В производстве дыхательных аппаратов изолирующего типа важнейшее значение имеет качество применяемого регенеративного продукта [1, 2]. Как показывает практика, в процессе изготовления регенеративного продукта наиболее важной стадией, определяющей качество готового продукта, является стадия сушки [3, 4]. Для контроля процесса производства и исследования кинетики сушки регенеративного продукта необходимо регистрировать изменение веса высушиваемых пластин во всем цикле получения готового продукта, от стадии пропитки до стадии упаковки [3]. Наибольший интерес и сложность получения кривой сушки при производстве регенеративного продукта представляет собой стадия вакуумной сушки. В работе [5] отдельно отмечены проблемы, возникающие при сушке регенеративных продуктов только под вакуумом. Рассмотрим технологию производства регенеративного продукта в сушильной камере при вакуумировании и инфракрасном нагреве. При этом возникают следующие осложняющие факторы: вакуум – приборы и/или датчики регистрации веса должны без проблем работать под вакуумом, так как сигнальную часть приборов и/или датчиков необходимо герметично вывести из сушильной камер для обеспечения заданной глубины вакуума; температура – приборы и/или датчики должны выдерживать и сохранять работоспособность при температурах до 130 °С (по условиям технологии производства регенеративного продукта), изоляция сигнальных линий также должна выдерживать температуру до 130 °С; вибрация – как показывает практика эксплуатации весовых измерительных приборов в сушильных установках, даже незначительная вибрация может приводить к потере точности измерений. В производстве регенеративного продукта вакуумная камера закреплена на раме, на которой установлено дополнительное оборудование, в той или иной мере являющееся

источником вибрации. При этом основным источником вибрации является вакуумный насос. Как показали измерения, наличие в системе крепления вакуумного насоса гасителей вибрации не исключает передачу вибраций на сушильную камеру и соответственно на измерительное оборудование.

Для выбора приборов и датчиков для измерения убыли веса в процессе сушки регенеративного материала в режиме реального времени рассмотрены следующие варианты: стандартные лабораторные электронные весы, тензодатчики и механические весы.

Экспериментальная часть

В качестве первого варианта рассматривались лабораторные электронные весы, работающие на основе преобразования механической силы (веса объекта) в электрический сигнал. К основным достоинствам таких весов для рассматриваемых условий можно отнести наличие платформы, выравниваемой по уровню, на которую помещается взвешиваемый объект; удобный цифровой дисплей, где отображается результат взвешивания и наличие памяти измерений с возможностью интерфейса с компьютером.

В процессе испытания лабораторных электронных весов в условиях вакуумной сушилки выявлены следующие основные недостатки: сильная чувствительность к ударам и вибрациям (в условиях измерений веса в сушильной камере лабораторные электронные весы выдают неточные показания при наличии даже незначительных вибраций); невозможность эксплуатации весов внутри вакуумной сушильной камеры при использовании инфракрасных нагревателей.

Соответственно, применение данного вида весов для исследования кинетики сушки и контроля технологического процесса в рассматриваемых условиях производства регенеративного продукта невозможно.

Во втором варианте анализировалось применение системы тензодатчиков, адаптированной для существующей конструкции сушильной камеры. Тензодатчики (тензометрические датчики) – устройства, которые преобразуют механическую деформацию (например, растяжение, сжатие или изгиб) в измеримый электрический сигнал. Они являются ключевыми компонентами в различных измерительных системах, особенно в весовом оборудовании. В основе работы тензодатчика лежит эффект тензорезистивности. Тензорезистор – чувствительный элемент, который изменяет свое электрическое сопротивление при деформации. Обычно он представляет собой тонкую металлическую фольгу, нанесенную на диэлектрическую подложку.

Когда на тензодатчик действует сила, он деформируется. Эта деформация приводит к изменению геометрических размеров тензорезистора (длины и поперечного сечения), что в свою очередь изменяет его электрическое сопротивление. Изменение сопротивления измеряется с помощью электрической схемы, обычно мостовой схемы Уитстона, преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный приложенной силе. Эта схема обеспечивает высокую точность и стабильность измерений в заданных условиях.

Также широкое применение находят полумостовые тензодатчики. Это разновидность тензодатчика, в котором используется не полный мост Уитстона из четырех тензорезисторов, а только его половина – два тензорезистора, что делает его более простым и экономичным в производстве.

Для исследования возможности применения тензодатчиков для непрерывного измерения веса в условиях вакуумной сушки регенеративного продукта выбраны полумостовые тензодатчики. По конструкции сушильной камеры кассета для сушки пластин в вакуумной камере устанавливается на металлические уголки. Для установки на них тензодатчиков разработаны, изготовлены и смонтированы

в камеру специальные уголки с широкой полкой. По краям уголков предусмотрены отверстия $1,5 \times 1,5$ см для возможности компенсации свободной деформации тензодатчика. Четыре тензодатчика крепятся к уголкам с краев, с тем чтобы измерительная часть тензодатчика находилась по центру отверстия. Сигнальные линии от них выводятся из камеры через герморазъем, где соединяются в мост Уитстона и подключаются к АЦП для преобразования измеряемой величины ЭДС в значения веса и передачи последних на ПК.

Разработанная конструкция уголков с тензодатчиками была установлена в вакуумную камеру взамен стандартных неподвижных креплений кассет высушиваемого продукта, что должно позволить измерять вес высушиваемой пластины в режиме реального времени. После установки тензодатчиков в камеру и подключения их к АЦП и компьютеру проведено несколько циклов с нагревом и вакуумированием камеры с установленной в нее пустой кассетой для сушки регенеративных продуктов с целью оценки значений, полученных с тензодатчиков и дальнейшей их калибровки.

Сопротивление тензорезисторов зависит от температуры, поэтому необходимо провести программную термокомпенсацию показаний, получаемых с тензодатчиков. Проведено три цикла нагрева камеры совместно с вакуумированием, в каждом из которых получена кривая веса. В результате экспериментов отмечено нелинейное влияние вакуумирования и нагрева камеры на показатели тензодатчиков. На рисунке 1 показаны кривые изменения показаний тензодатчиков при измерении веса эталонной гири (не меняющей свой вес) в процессе вакуумирования и нагрева камеры. Как видно из графиков, при вакуумировании камеры значение веса, получаемое с тензодатчиков, начинает уменьшаться, далее при нагревании камеры вес начинает расти.

При этом разница в показаниях в конце цикла и между циклами для отдельных экспериментов (в данном случае три эксперимента) составляет порядка 10 г. При анализе полученных данных с таким разбросом значений между циклами не представляется возможным сделать программную термокомпенсацию влияния вакуума и температуры на получаемые значения веса. В связи обнаруженным эффектом было решено отказаться от использования тензодатчиков для измерения веса высушиваемого регенеративного продукта в режиме реального времени в условиях вакуума.

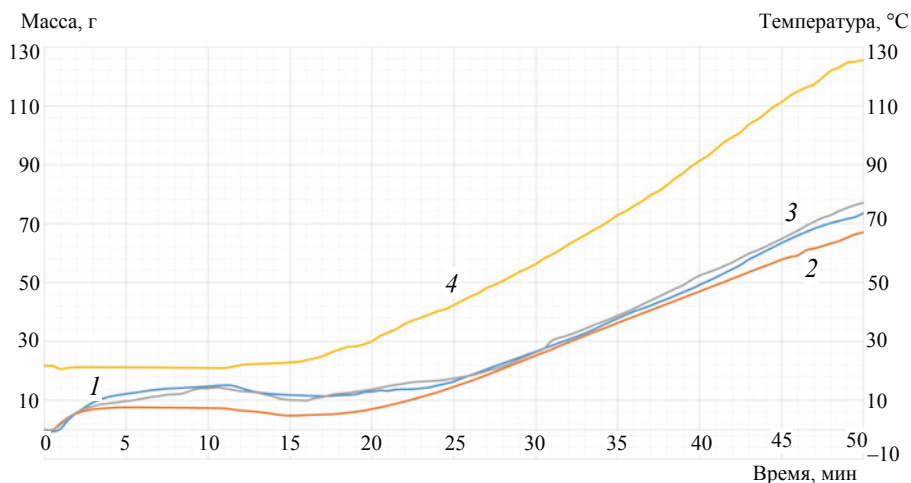


Рис. 1. Зависимость показаний тензодатчиков от температуры:

1, 2, 3 – изменение массы – первый, второй и третий эксперименты соответственно;
4 – изменение температуры в камере

Рассмотрим третий вариант – механические весы, в которых используются пружины, рычаги или противовесы. В условиях работы в сушильной камере механические весы обладают следующими преимуществами: не требуют подключения к источнику питания, имеют простую конструкцию, могут эксплуатироваться при высокой влажности, температуре или запыленности. Конструкция механических чашечных весов была модернизирована. Для измерения убыли веса в реальном времени в процессе вакуумной сушки на вал индикации веса установлен датчик угла поворота.

Для автоматического считывания показаний положения вала весов применяется бесконтактный электронный датчик угла поворота AS5600, использующий магнитное поле для определения положения. Он относится к категории абсолютных энкодеров, то есть выдает абсолютное значение угла, а не относительное, как инкрементальные энкодеры. Это значит, что после выключения и включения питания датчик сразу знает свое текущее положение. Данное устройство использует четыре датчика Холла для измерения магнитного поля, создаваемого магнитом, расположенным на вращающейся оси. Измеренное магнитное поле преобразуется в цифровой код, соответствующий углу поворота. Основные достоинства применяемого датчика в условиях исследований кинетики вакуумной сушки: бесконтактное измерение – отсутствие механического контакта исключает износ и обеспечивает долгий срок службы; абсолютный энкодер – сохраняет информацию об угле поворота даже после отключения питания; высокое разрешение – 12-битный АЦП обеспечивает 4096 шагов на оборот, что соответствует угловому разрешению $0,088^\circ$; программируемый – возможность настройки параметров, таких как нулевое положение и режим вывода; широкий диапазон рабочих температур $40 \dots 120^\circ\text{C}$; устойчивость к внешним магнитным полям.

Для крепления датчика на вал весов изготовлен специальный пластиковый корпус (использовалась технология 3D-печати). В передней части корпуса напротив микросхемы расположено отверстие, где запрессована латунная втулка, используемая в качестве подшипника скольжения для вала, на одном конце которого закреплен магнит, другим концом вал закрепляется на штоке стрелки весов.

Вал изготовлен из фторопласта для уменьшения теплопередачи от весов к магниту. Корпус датчика угла теплоизолирован в 2 слоя и закреплен на основании весов. Сигнальные линии от датчика изготовлены из проводов с термостойкой фторопластовой изоляцией и помещены дополнительно в медную оплетку. Сигнальные линии выведены из камеры посредством гермоввода и подключены через микроконтроллер к компьютеру для отображения и регистрации показаний.

Корпус весов приварен к специальному основанию, для повышения устойчивости и возможности установки весов по уровню. Сверху вместо стандартной чаши приварена нижняя решетка кассеты. Весы установлены в вакуумную камеру. Схема механических весов с датчиком угла поворота представлена на рис. 2.

Механическая часть весов позволяет проводить измерения веса образцов в диапазоне $1 \dots 5$ кг. Как показали испытания откалиброванных модернизированных весов с датчиком угла поворота, чувствительность новых весов составляет 1 г.

Для испытания разработанных весов проведены циклы экспериментов с нагревом ($20, 60, 100, 130^\circ\text{C}$) и вакуумированием (при таких же температурах) сушильной камеры по определению веса эталонного образца (гиря 50 г) и пластины регенеративного продукта, изменяющего вес в течение процесса сушки.

Результаты экспериментов по измерению веса эталонного образца на модернизированных механических весах при рассматриваемых режимах работы сушильной камеры показали отсутствие влияния вакуумирования и нагрева в диапазонах изменения технологических параметров производства регенеративного продукта. Вес образца (50 г) до нагрева и после не изменился, погрешность составила 0 %.

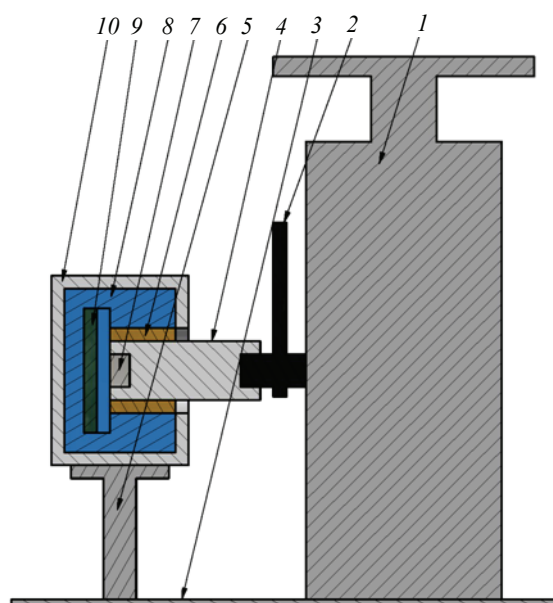


Рис. 2. Схема механических весов с датчиком угла поворота:
 1 – корпус; 2 – вал со стрелкой; 3 – основание; 4 – фторопластовый вал;
 5 – стойка для крепления датчика угла поворота; 6 – латунная втулка; 7 – магнит;
 8 – корпус датчика угла поворота; 9 – датчик угла поворота; 10 – теплоизоляция

Таблица 1

Результаты испытаний модернизированных механических весов при сушке пластины регенеративного продукта при нагреве и вакуумировании камеры

Номер эксперимента	g_1 , г	g_2 , г	Δ_1 , %	g_3 , г	g_4 , г	Δ_2 , %
1	456,3	455	0,28	187	188,2	0,64
2	454,1	453	0,24	183	184,1	0,60
3	459,8	457	0,61	188	187,9	0,05
4	461,7	459	0,58	189	187,9	0,58
5	451,3	450	0,29	179	180,4	0,78

Для проверки точности модернизированных механических весов при получении кривой сушки пропитанную пластину взвешивали отдельно на лабораторных весах (значение g_1), затем устанавливали пластину на весы в сушильную камеру и считывали значение веса пластины с механических весов g_2 . Далее проводили монтаж пластины в оснастку (вес оснастки составляла 3255 г), вакуумирование и нагрев камеры. В процессе сушки пластины регистрировали убыль веса. По окончании процесса сушки записывали значение веса высушенной пластины с механических весов без учета веса оснастки g_3 . Затем извлекали пластину из оснастки и взвешивали ее отдельно на лабораторных весах (значение g_4). Результаты экспериментов по измерению веса высушиваемой пластины при вакуумировании и нагреве камеры представлены в табл. 1: погрешность измерения веса высушиваемого образца до сушки Δ_1 не превышает 0,61 %, после проведения процесса сушки Δ_2 – не превышает 0,78 %.

Заключение

Для получения достоверной кривой сушки при исследовании кинетики вакуумной сушки регенеративного продукта испытаны лабораторные электронные весы, специализированные весы, разработанные на основе применения тензодатчиков и модернизированные механические весы. Показано, что применение стандартных лабораторных электронных весов и специализированных весов на тензодатчиках не позволяет получить корректные данные по убыли веса при сушке регенеративного продукта в вакууме. Разработана конструкция модернизированных механических весов, которая проводит измерения веса образцов в диапазоне 1...5 кг с чувствительностью до 1 г, не испытывая при этом влияния вакуумирования и нагрева сушильной камеры. Разработанная конструкция весов может быть рекомендована для использования как в исследованиях кинетики сушки регенеративного продукта, так и в промышленном производстве регенеративного продукта для контроля веса во всем цикле производства, от стадии пропитки до стадии упаковки.

Список литературы

1. Еськов, В. А. Регенеративный материал с улучшенными характеристиками для дымозащитного капюшона / В. А. Еськов, Р. В. Дорохов, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2024. – Т. 30, № 1. – С. 122 – 129. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.122-129
2. Пат. на полезную модель № 185705 Российская Федерация, МПК А62В 7/08 (2006.01). Изолирующий дыхательный аппарат / Дорохов Р. В., Ферапонтов Ю. А., Плотников М. Ю., Еськов В. А., Рязанов И. В. ; ОАО «Корпорация «Росхимзащита». – № 2018131780 ; заявл. 03.09.18 ; опубл. 14.12.18, Бюл. № 35. – 15 с.
3. Еськов, В. А. Влияние процесса сушки на качество регенеративного продукта на основе надпероксида калия / В. А. Еськов, А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 16, № 4. – С. 597 – 602. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.597-602
4. Кинетика взаимодействия диоксида углерода с надпероксидом калия / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий [и др.] // Химическая физика. – 2007. – Т. 26, № 10. – С. 67 – 70.
5. Дорохов, Р. В. Аппаратурно-технологическое оформление процесса синтеза регенеративного продукта на матрице с улучшенными хемосорбционными характеристиками : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Дорохов Роман Викторович. – Тамбов, 2007. – 187 с.

Features of Weight Measurement during the Process of Drying a Regenerative Product in Vacuum

V. A. Eskov^{1,2}, A. N. Pakhomov¹✉

Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, TSTU (1), panpost@yandex.ru; JSC “Roskhimzashchita” (2), Tambov, Russia

Keywords: vacuum; scales; angle sensor; drying kinetics; regenerative product; drying; strain gauge.

Abstract: The article considers the possibilities of using standard laboratory electronic scales, scales based on a strain gauge system and modernized mechanical scales in a vacuum drying chamber. It is shown that standard laboratory electronic scales and specialized scales on strain gauges do not allow obtaining correct data on weight loss during drying of the regenerative product in a vacuum. A design of

mechanical scales has been developed that excludes the influence of vacuumization and heating of the drying chamber, allowing to measure the weight of dried samples in the range from 1 to 5 kg with a sensitivity of up to 1 g.

References

1. Yes'kov V.A., Dorokhov R.V., Pakhomov A.N. [Regenerative material with improved characteristics for a smoke-protective hood], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 122-129. doi: 10.17277/vestnik.2024.01.pp.122-129 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Dorokhov R.V., Ferapontov Yu.A., Plotnikov M.Yu, Yes'kov V.A., Ryazanov I.V. *Izoliruyushchiy dykhatel'nyy apparat* [Isolating breathing apparatus], Russian Federation, 2018, Pat. for utility model 185705. (In Russ.)
3. Yes'kov V.A., Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts. [Influence of the drying process on the quality of a regenerative product based on potassium superoxide], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 597-602. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.597-602 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoretzkiy S.I. [et al.], [Kinetics of interaction of carbon disulfide dioxide with potassium superoxide], *Khimicheskaya fizika* [Chemical Physics], 2007, vol. 26, no. 10, pp. 67-70. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Dorokhov R.V. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Tambov, 2007, 187 p. (In Russ.)

Besonderheiten der Gewichtsmessung beim Trocknen eines regenerativen Produkts im Vakuum

Zusammenfassung: Es sind die Möglichkeiten der Verwendung von standardmäßigen elektronischen Laborwaagen, Waagen auf Basis eines Dehnungsmessstreifen-systems und modernisierten mechanischen Waagen in einer Vakuumtrocknungskammer betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass herkömmliche elektronische Laborwaagen und Spezialwaagen mit Dehnungsmessstreifen keine korrekten Daten zum Gewichtsverlust während der Trocknung des regenerativen Produkts im Vakuum liefern. Für mechanische Waagen ist ein Design entwickelt, das den Einfluss auf das Absaugen und Erwärmen der Trockenkammer eliminiert und so Gewichtsmessungen getrockneter Proben im Bereich von 1 bis 5 kg mit einer Empfindlichkeit von bis zu 1 g ermöglicht.

Caractéristiques de la mesure du poids dans le processus de séchage du produit régénérateur sous vide

Résumé: Est examinée la possibilité d'utiliser des balances électroniques de laboratoire standard, des balances construites à la base d'un système de cellule de charge et des balances mécaniques améliorées dans la chambre de séchage sous vide. Est démontré que les balances électroniques de laboratoire standard et les balances spécialisées sur les jauges de contrainte ne permettent pas d'obtenir des données correctes sur la perte de poids lors du séchage du produit régénérateur sous vide. Est élaborée la conception des balances mécaniques qui élimine les effets de l'aspiration et du chauffage de la chambre de séchage, permettant de mesurer le poids des échantillons prélevés dans la plage de 1 à 5 kg avec une sensibilité allant jusqu'à 1 G.

Авторы: *Еськов Владимир Александрович* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; старший научный сотрудник АО «Росхимзащита», Тамбов, Россия; *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.