Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-114-122 Оригинальная статья/Research article
УДК 681.5: 66.047 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Управление сушильной установкой на основе эксергетического критерия и регрессионных методов

Лариса Г. Тугашова [1] tugashova@yandex.ru 0000-0001-9331-3142

1 Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», ул. Советская, 186а, г. Альметьевск, 423462, Россия

Аннотация. На сегодня вопросы энергосбережения являются актуальными. Сушка материалов в различных отраслях промышленности топливно-энергетического комплекса относится к числу энергоемких технологий. Обзор литературы показал, что предлагаемые мероприятия по повышению эффективности работы сушильных установок, в основном, носят технологический характер. Для усовершенствования работы сушильных установок предлагается подход, основанный на применении регрессионных методов и алгоритмов управления на их основе. Актуальным является применение эксергетического баланса. Так как расчет эксергетического баланса является сложным и трудоемким, то предлагается на его основе построить упрощенную модель. Для получения математического описания сушильной установки использованы модели, построенные на уравнениях баланса массы и эксергии. Приведена схема распылительной сушильной установки замкнутого типа. Составлена модель сушильной установки на основе эксергетического баланса. Получены результаты расчета эксергии топливного газа, термомеханической эксергии продуктов горения, а также эксергии на испарение влаги. Предложена методика, состоящая из последовательности шагов: расчет материального и теплового балансов, расчет эксергетического баланса, формирование обучающей выборки на основе балансовой модели, построение упрощенной регрессионной зависимости между входными и выходными параметрами, оптимизация с учетом ограничений на показатели качества, разработка алгоритмов управления сушильной установкой. Выбраны методы, необходимые для выполнения шагов методики. Для вывода регрессионной зависимости предложено применение ротатабельного центрального композиционного плана. Предложен критерий оптимизации – эксергетический КПД газовой топки и сушильной камеры. Получена регрессионная зависимость эксергетического КПД сушильной камеры от температуры сушильного агента на входе, влажности поступающей суспензии и расхода топливного газа. Значение коэффициента детерминации составляет 0,96, что свидетельствует об адекватности полученной модели исходным данным. Приведена структурная схема управления сушильной установкой с учетом выбранных управляющих и возмущающих параметров. Предложенная методика может применяться для определения оптимальных параметров управления сушильной установкой. Дальнейшие исследования могут быть направлены на детализацию и программную реализацию данной методики.

Ключевые слова: эксергия, топливо, суспензия, баланс, эксперимент, управление.

Drying Plant Management Based on Exergy Criterion and Regression Methods

Larisa G. Tugashova [1] tugashova@yandex.ru 0000-0001-9331-3142

1 Almetyevsk State Technological University «Higher School of Petroleum», 186a, Sovetskaya st., Almetievsk, 423462, Russia

Abstract. Today, energy-saving issues are relevant. Drying of materials in various industries of the fuel and energy complex is one of the energy-intensive technologies. The literature review showed that the proposed measures to improve drying plants' efficiency are mainly technological. To improve the drying plants' operation, we propose an approach using regression methods and control algorithms based on them. It is relevant to apply the exergy balance. Since the calculation of exergy balance is complex and time-consuming, we propose building a simplified model based on it. To obtain a mathematical description of a drying unit, we use models based on the equations of mass balance and exergy. A diagram of a spray closed-type drying unit is given. We provide a model of a drying plant based on exergy balance. The results of calculating the exergy of fuel gas, thermomechanical exergy of combustion products, and exergy for moisture evaporation were obtained. The proposed methodology consists of a sequence of steps: calculating material and thermal balances, calculating the exergy balance, providing a training sample based on a balance model, constructing a simplified regression relationship between input and output parameters, optimizing the model taking into account restrictions on quality indicators, and developing control algorithms for the drying plant. The selected methods allow completing the above steps. To derive the regression dependence, we use a rotatable central compositional plan. An optimization criterion is the exergy efficiency of a gas furnace and a drying chamber. We obtained the regression dependence of the exergy efficiency of the drying chamber on the temperature of the drying agent at the inlet, the humidity of the incoming slurry, and the fuel gas consumption. The coefficient of determination is 0,96, indicating that the model adequately fits the original data. A block diagram of the drying unit control is given, taking into account the selected control and disturbing parameters. The proposed method can be used to determine the optimal control parameters of the drying unit. Further research may be aimed at the details and programmatic implementation of this technique.

Keywords: exergy, fuel, suspension, balance, experiment, management.

Для цитирования

Тугашова Л.Г. Управление сушильной установкой на основе эксергетического критерия и регрессионных методов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 114–122. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-114-122

For citation

Tugashova L.G. Drying Plant Management Based on Exergy Criterion and Regression Methods. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 114–122. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-114-122

© 2026, Тугашова Л.Г. / Tugashova L.G.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Процессы сушки различных материалов являются энергозатратными. Проведенный анализ научной литературы [1–19] показал, что существует достаточное количество работ по применению термодинамических методик к действующим установкам сушки. В основном, предлагаются усовершенствования технологического характера. Авторами разработаны различные математические и имитационные модели процесса сушки, а также рекомендации по корректировке технологических параметров процесса, модернизации оборудования для снижения потерь, оптимизации режимов работы.

Процесс сушки различных материалов характеризуется сложными взаимосвязями параметров и является многомерным. Для анализа работы сушильных установок выполняются материальные, энергетические (тепловые) и эксергетические балансы. Эксергетический КПД ниже энергетического из-за скрытых необратимых потерь. В этом случае учитывается качество видов энергии.

Для повышения эффективности функционирования распылительной сушильной установки замкнутого типа предложена методика, позволяющая перейти от расчета эксергетического баланса и КПД к упрощенной модели. Такой переход предлагается осуществить методом с применением ротатабельного центрального композиционного плана (РЦКП). Затем с помощью матрицы планирования определяется регрессионная модель, связывающая эксергетические КПД элементов сушильной установки с управляющими, возмущающими параметрами и показателями качества осушенного материала. Полученные результаты применяются для регулирования параметров технологического процесса.

Материалы и методы

Сушильные установки по конструкции бывают следующих типов: барабанные, распылительные, ленточные, трубные и другие. Они различаются режимом работы (периодического и непрерывного действия), видом сушильного агента (воздух, инертные или дымовые газы, насыщенный или перегретый пар), способом нагрева сушильного агента и способом подвода тепла к материалу.

На сегодня в различных отраслях топливно-энергетического комплекса распространены конвективные сушилки. Например, в секции сушки установки быстрого пиролиза древесной биомассы сушильным агентом являются дымовые газы, поступающие из теплогенератора. На установке получения микробного белка из метана сушильным агентом является азот или воздух. В данном случае применяется установка замкнутого типа.

Схема распылительной сушильной установки замкнутого типа состоит из следующих элементов (рисунок 1).

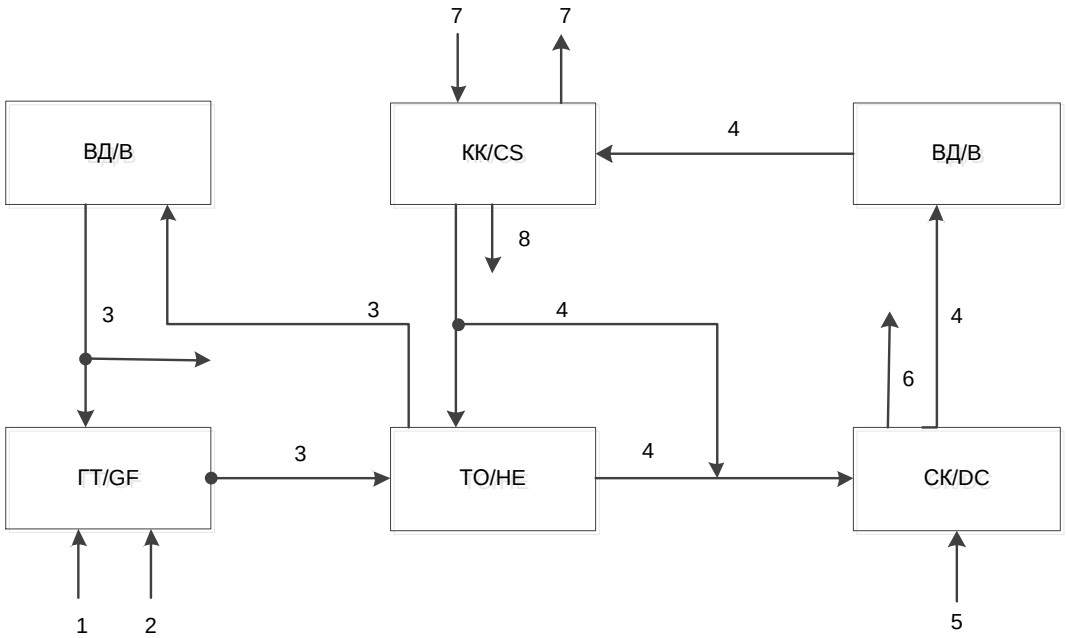


Рисунок 1. Схема распылительной сушильной установки замкнутого типа: ГТ – газовая топка; ТО – теплообменник; СК – сушильная камера; ВД – воздуходувка; КК – конденсатор с каплеотделителем; 1 – природный газ; 2 – воздух; 3 – дымовые газы; 4 – сушильный агент; 5 – бактериальная суспензия; 6 – осушенная суспензия (биомасса); 7 – оборотная вода; 8 – сконденсированная влага

Figure 1. Diagram of a spray closed-type drying unit: GF – gas furnace; HE – heat exchanger; DC – drying chamber; B – blower; CS – condenser with a drip separator; 1 – natural gas; 2 – air; 3 – flue gases; 4 – drying agent; 5 – bacterial suspension; 6 – dried suspension (biomass); 7 – recycled water; 8 – condensed moisture

Продукцией установки получения микробного белка из метана является высушенная суспензия (биомасса). Сушильная установка предназначена для высушивания биомассы и получения готовой продукции в виде порошка. Процесс осуществляется в контуре замкнутого цикла в сушильной камере распылительного типа. Содержание влаги в готовом продукте составляет не более 10% масс.

В качестве сушильного агента 4 используется азот или воздух, который нагревается в теплообменнике ТО до температуры 180 °С и подается в сушильную камеру СК. Бактериальная суспензия 5 перекачивается к форсункам, установленным в верхней части распылительной камеры. При контакте с сушильным агентом, влага, содержащаяся в каплях суспензии, испаряется. Осушенная суспензия 6 в виде порошка оседает на дно распылительной камеры. Часть осушенной суспензии 6, уносимой с сушильным агентом, улавливается в циклоне и направляется в общий поток.

Сушильный агент 4 с испаренной влагой поступает в систему рециркуляции. В конденсаторе с каплеотделителем КК сушильный агент охлаждается до температуры 30 °С оборотной водой 7, из него удаляется сконденсированная влага 8. Затем поток азота или воздуха направляется в теплообменник ТО и частично смешивается с выходным потоком ТО для поддержания необходимой температуры на входе в сушильную камеру СК. Перемещение сушильного агента в контуре рециркуляции осуществляется воздуходувками ВД.

Топливом для газовой топки ГТ является природный газ 1. Для поддержания процесса горения поступает воздух 2. Дымовые газы 3, пройдя через теплообменник ТО, частично возвращаются в газовую топку ГТ, где смешиваются с горячими продуктами сгорания. Другая часть дымовых газов 3 уходит в атмосферу через дымовую трубу. Для эффективного режима работы газовой топки ГТ важным параметром является коэффициент избытка воздуха.

В процессе сушки участвуют сушильный агент, материал и испаряющаяся из материала влага.

На первом шаге выполняются материальный и тепловой балансы установки. К числу основных определяемых материальных потоков относятся количество удаляемой в единицу времени влаги U и расход высушенного материала. Согласно закону сохранения вещества масса влажного материала (бактериальной суспензии) G_1, входящего в сушильную камеру в единицу времени, должна быть равна сумме массы высушенного материала (осушенной суспензии) G_2, выходящего из сушильной камеры в единицу времени, и массы испаренной влаги U.

Материальный баланс имеет следующий вид:

$$G_1 = G_2 + U. \quad (1)$$

Масса испаренной влаги определяется следующим образом:

$$U = G_1 \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}. \quad (2)$$

Массу высушенного материала на основе массы сырого можно определить:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2}, \quad (3)$$

где W_1 – начальное влагосодержание, выраженное в процентах; W_2 – конечное влагосодержание, выраженное в процентах.

Материальный и тепловой балансы составляются исходя из законов сохранения материи и энергии. Под потерями в этих балансах подразумевается переход вещества из системы в окружающую среду. При необратимых процессах происходит ухудшение качеств энергии и необратимые потери эксергии.

На втором шаге выполняется эксергетический расчет. В процессе тепломассообмена меняется не только количество энергии, но и ее качество. В связи с этим для оценки эффективности процесса сушки применим эксергетический анализ, основанный на втором законе термодинамики.

Удельная эксергия топлива (природного газа) определяется по формуле [1]:

$$e_{\text{Т}} = 1{,}04 \cdot Q^{\text{Р}}_{\text{н}}, \quad (4)$$

где $Q^{\text{Р}}_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания рабочего топлива, кДж/м^3.

Низшая теплота сгорания рабочего топлива определяется по формуле [20]:

$$Q^{\text{Р}}_{\text{н}} = 358\text{CH}_4 + 640\text{C}_2\text{H}_6 + 930\text{C}_3\text{H}_8 + 1200\text{C}_4\text{H}_{10},$$

где CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10} – объемное содержание метана, этана, пропана, бутана.

В расчете эксергии горения определяются термомеханическая и химическая эксергия.

Термомеханическая составляющая продуктов сгорания определяется по формуле [21]:

$$e_{\text{ТМ}} = (h - h_0) - T_0 (S - S_0), \quad (5)$$

$$h = \sum_{i=1}^{4} (y_i \cdot c_{pi}) \cdot t,$$

$$S = \sum_{i=1}^{4} y_i \cdot s_i,$$

где h – энтальпия газов (продуктов сгорания), кДж/кг; S – энтропия газов, кДж / (кг×К); y_i – массовая доля газов; c_{pi} – теплоемкость газов, кДж/кг К; t – температура, ˚С.

Эксергетический КПД газовой топки вычисляется по формуле:

$$\eta_{\text{ЭКС1}} = \frac{D \cdot \Delta e_{\text{ТМ}}}{B \cdot e_{\text{Т}}}, \quad (6)$$

где D – расход продуктов сгорания, кг/ч; B – расход топливного газа, м^3/ч.

Полезной статьей эксергетических затрат является эксергия на испарение влаги из материала при соответствующей температуре испарения.

Полезные затраты эксергии на испарение влаги [3]:

$$\Delta e_{\text{ИСП}} = \left(h_{\text{П}} - h_{\text{К}}\right) - T_0\left(S_{\text{П}} - S_{\text{К}}\right), \quad (7)$$

где h – энтальпия водяного пара и воды, кДж/кг; T_0 – температура окружающей среды, К; S – энтропия водяного пара и воды, кДж/(кг×К).

Параметры h и S находятся при температуре мокрого термометра $t_{\text{М.Т.}}$ [22], определяемой по известной температуре t и влагосодержании сушильного агента x:

$$h_{\text{ВЛ.В.}} = \left(1,01 + 1,97 \cdot x\right) \cdot t + 2493 \cdot x,$$

$$t_{\text{М.Т.}} = 43,5 \cdot lg\left(h_{\text{ВЛ.В.}}\right) - 56,6,$$

где $h_{\text{ВЛ.В.}}$ – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг.

Эксергетический КПД сушильной установки определяется следующим образом:

$$\eta_{\text{ЭКС2}} = \frac{U \cdot \Delta e_{\text{ИСП}}}{B \cdot e_{\text{Т}}}. \quad (8)$$

Статьи потерь следующие. Эксергия топлива, израсходованная на нагрев влаги и на перегрев паров, относится к потерям. Другие виды потерь в сушильной камере: на нагрев материала, вследствие необратимости внешнего и внутреннего теплообмена, потери в газовой топке, в окружающую среду, эксергия сушильного агента на выходе сушильной установки.

Третьим шагом является определение зависимости между входными (управляющими и возмущающими) параметрами, показателями качества и выходным критерием. В нашем случае входными параметрами принимаются коэффициент избытка воздуха, расход топлива, температура сушильного агента на входе в сушильную камеру, влагосодержание суспензии на входе и выходе, выраженное в процентах. Выходным критерием является эксергетический КПД. Определение такой зависимости предлагается выполнять с применением РЦКП.

При применении РЦКП по общеизвестным формулам определяется центр плана, шаг варьирования, звездное плечо, уровни варьирования. Затем выполняется построение матрицы планирования с учетом найденных ранее параметров РЦКП. Значения выходного параметра определяются по модели сушильной установки, построенной на основе эксергетического баланса. Затем осуществляется проверка адекватности полученной модели.

В РЦКП существует заранее заданная структура модели. Вид структуры модели определен квадратичной зависимостью.

На четвертом шаге с применением полученной регрессионной зависимости критерия от факторов с учетом ограничений на технологические параметры, показатели качества выходного продукта и действующих возмущений решается задача оптимизации. Применяются методы многокритериальной оптимизации, метод неопределенных множителей Лагранжа.

В методе неопределенных множителей Лагранжа задача сводится к максимизации целевой функции $f(x)$ при наличии ограничений в виде равенств [23]:

$$F\left(x, \lambda, u\right) = f\left(x\right) + \sum_{i=1}^{m} \lambda_i \cdot \left(g_i\left(x\right) + u_i^2 - b_i\right), \quad (9)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа; m – число ограничений.

Ограничения в виде неравенств преобразованы в ограничения в виде равенств путем добавления к каждому из них неотрицательной ослабляющей переменной u^2:

$$g_i\left(x\right) + u_i^2 - b_i = 0.$$

Пятый шаг методики состоит в использовании полученных оптимальных значений управляющих параметров в системе управления сушильной установкой. При этом управляющие параметры определяются одновременно. В случае наличия возмущающих параметров предлагается применение систем каскадного, каскадно-комбинированного и экстремального регулирования.

Результаты и обсуждение

В качестве исходных данных приняты следующие параметры: температура сушильного агента при входе в сушильную камеру t_1 = 180 °С; температура окружающей среды t_0 = 0 °С; температура подаваемой бактериальной суспензии θ_1 = 20 °С; влагосодержание сушильного агента, подаваемого в сушильную камеру x_1 = 0,02 кг/кг; начальная влажность суспензии W_1 = 87%; конечная влажность суспензии W_2 = 10%; расход топливного газа B = 68 м^3/ч.

Производительность сушильной установки по испаренной влаге составляет 808,5 кг/ч, а производительность по готовому продукту (биомассе) – 136,5 кг/ч (формулы (2) и (3)).

Состав природного газа приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Состав природного газа

Table 1.

Natural gas composition

Компонент Component	Содержание, % об. Percent, % vol.
Углекислый газ Carbon dioxide gas	0,02
Кислород | Oxygen	0
Азот | Nitrogen	1,6
Метан | Methane	94,4
Этан | Ethan	2,9
Пропан | Propane	0,61
Изобутан | Iso-butane	0,23
Н-бутан | N-butane	0,24

Расчеты параметров выполнены с применением программных средств Matlab и Excel. Теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг топлива, рассчитано по общепринятой методике и составляет 16,78 кг/кг топлива.

Действительное количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг топлива при коэффициенте избытка воздуха 1,08 составляет 18,12 кг/кг топлива.

Удельная эксергия топлива (природного газа) по формуле (4) с учетом объемного состава природного газа из таблицы 1 составляет 38253,8 кДж/м^3.

В таблице 2 приведены результаты расчета энтальпии, энтропии и состава продуктов сгорания.

Таблица 2.

Результат расчета состава продуктов сгорания, энтальпии и энтропии

Table 2.

Result of calculating the composition of combustion products, enthalpy and entropy

Продукты сгорания Combustion products	CO_2	H_2O	O_2	N_2	Сумма Addition
Состав продуктов сгорания, y_i | Composition of combustion products, y_i	0,1410	0,1115	0,0181	0,7312	1
Энтальпия при 0 ˚С, h_i^0, кДж/кг | Enthalpy at 0 ˚С, h_i^0, kJ/kg	192,10	502,90	247,70	283,30	
Произведение, $y_i \times h_i^0$ | Multiplication, $y_i \times h_i^0$	27,10	56,12	4,51	207,15	294,87
Энтальпия при 700 ˚С, h_i^{700}, кДж/кг | Enthalpy at 700 ˚С, h_i^0, kJ/kg	939,10	1931,20	950,90	1044,00	
Произведение, $y_i \times h_i^{700}$ | Multiplication, $y_i \times h_i^{700}$	132,48	215,52	17,30	763,36	1128,65
Энтропия при 0 ˚С, s_i^0, кДж / (кг×К) | Entropy at 0 ˚С, s_i^0, kJ/(kg×K)	4,78	10,31	6,33	6,74	
Произведение, $y_i \times s_i^0$ | Multiplication, $y_i \times s_i^0$	0,67	1,15	0,12	4,93	6,87
Энтропия при 700 ˚С, s_i^{700}, Дж / (кг×К) | Entropy at 700 ˚С, s_i^{700}, kJ/(kg×K)	6,08	12,85	7,58	8,11	
Произведение, $y_i \times s_i^{700}$ | Multiplication, $y_i \times s_i^{700}$	0,86	1,43	0,14	5,93	8,36

Термомеханическая эксергия продуктов сгорания по формуле (5) с учетом таблицы (2) составляет 427,61 кДж/кг.

Эксергетический КПД газовой топки, вычисленный по формуле (6), равен 52,56%.

Полезные затраты эксергии на испарение влаги определяются по формуле (7) и составляют 211,2578 кДж/кг испаренной влаги. Эксергетический КПД сушильной установки равен 9,56% (формула (8)).

Возмущающим воздействием является влажность суспензии на входе в сушильную камеру. Показателем качества является влажность суспензии на выходе. При составлении матрицы планирования данный показатель принят равным 10%. Определена регрессионная зависимость эксергетического КПД сушильной камеры от следующих факторов: $X1$ – расход топлива (управляющий параметр); $X2$ – температура сушильного агента на входе (управляющий параметр); $X3$ – влажность поступающей суспензии (возмущающий параметр).

Для каждого фактора задан физический диапазон изменения. Полученные значения параметров РЦКП приведены в таблице 3. Матрица планирования и результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 3.

Параметры РЦКП

Table 3.

Parameters of the rotatable central compositional plan (RCCP)

Факторы Factors	Основной уровень Main level	Интервал варьирования Variation interval	Верхний уровень, +1 Upper level, +1	Нижний уровень, -1 Lower level, -1	Верхняя звездная точка, +1,68 Upper star point, +1,68	Нижняя звездная точка, -1,68 Lower star point, -1,68
$X1$	68	5	73	63	76,41	59,59
$X2$	180	18	198	162	210,27	149,73
$X3$	87	5	92	82	95,41	78,59

Таблица 4.

Матрица планирования

Table 4.

Planning matrix

N	Части РЦКП Parts of the RCCP	Натуральные значения факторов Natural factor values			Кодированные значения факторов Coded factor values			Эксергетический КПД сушильной камеры из баланса $\eta_{ЭКС2}$, % Exergy efficiency of the drying chamber from the balance η_{EX2}, %	Эксергетический КПД сушильной камеры по модели y, % Exergy efficiency of the drying chamber to the model y, %
		Расход топлива, м³/ч Fuel gas consumption, m³/hr	Температура СА на входе, ˚С Temperature of the drying agent at the inlet, ˚С	Влажность поступающей суспензии, % Humidity of the incoming slurry, %	$X1$	$X2$	$X3$		
1	Ядро плана Core of the plan	73	198	92	1	1	1	9,89	10,07
2		63	198	92	-1	1	1	11,46	11,66
3		73	162	92	1	-1	1	8,76	9,05
4		63	162	92	-1	-1	1	10,15	10,47
5		73	198	82	1	1	-1	8,68	8,84
6		63	198	82	-1	1	-1	10,06	10,16
7		73	162	82	1	-1	-1	7,69	7,88
8		63	162	82	-1	-1	-1	8,91	9,12
9	Звездные Точки Star points	76,41	180	87	1,68	0	0	8,71	8,53
10		68	210,27	87	0	1,68	0	10,50	10,41
11		68	180	95,41	0	0	1,68	10,85	10,62
12		59,59	180	87	-1,68	0	0	11,16	10,92
13		68	149,73	87	0	-1,68	0	9,03	8,68
14		68	180	78,59	0	0	-1,68	8,72	8,52
15	Нулевые точки Zero points	68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
16		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
17		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
18		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
19		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80
20		68	180	87	0	0	0	9,78	9,80

С использованием известных формул для расчета коэффициентов уравнения регрессии получена следующая модель:

$$y = 9{,}79622 \cdot X0 - 0{,}70966 \cdot X1 + 0{,}51541 \cdot X2 + \\ + 0{,}62261 \cdot X3 - 0{,}04198 \cdot X12 - 0{,}04516 \cdot X13 + \\ + 0{,}03708 \cdot X23 - 0{,}02643 \cdot X1^2 - 0{,}08823 \cdot X2^2 - \\ - 0{,}08023 \cdot X3^2. \quad (10)$$

Значимость коэффициентов в модели (10) проверялась по критерию Стьюдента. Все коэффициенты значимы, следовательно, не исключаются из уравнения. Оценка адекватности регрессионной зависимости определялась по коэффициенту детерминации. Значение коэффициента детерминации составляет 0,96, следовательно, полученная модель (10) адекватна исходным данным.

Аналогичным образом можно построить регрессионные модели для эксергетического КПД газовой топки (6) в зависимости от расхода топлива, коэффициента избытка воздуха, температуры смешанных продуктов сгорания. Также возможно составить подобные модели для теплообменных аппаратов сушильной установки. Затем решается задача оптимизации вида (9).

В качестве целевой функции в выражении (9) выступают сумма или произведение полученных моделей для эксергетических КПД элементов сушильной установки. Ограничениями являются значения показателей качества продукции и технологических параметров. Значения управляющих параметров, найденные в результате решения оптимизации, используются в качестве уставок регуляторов системы управления сушильной установкой (рисунок 2). Они пересчитываются при изменении возмущающих параметров.

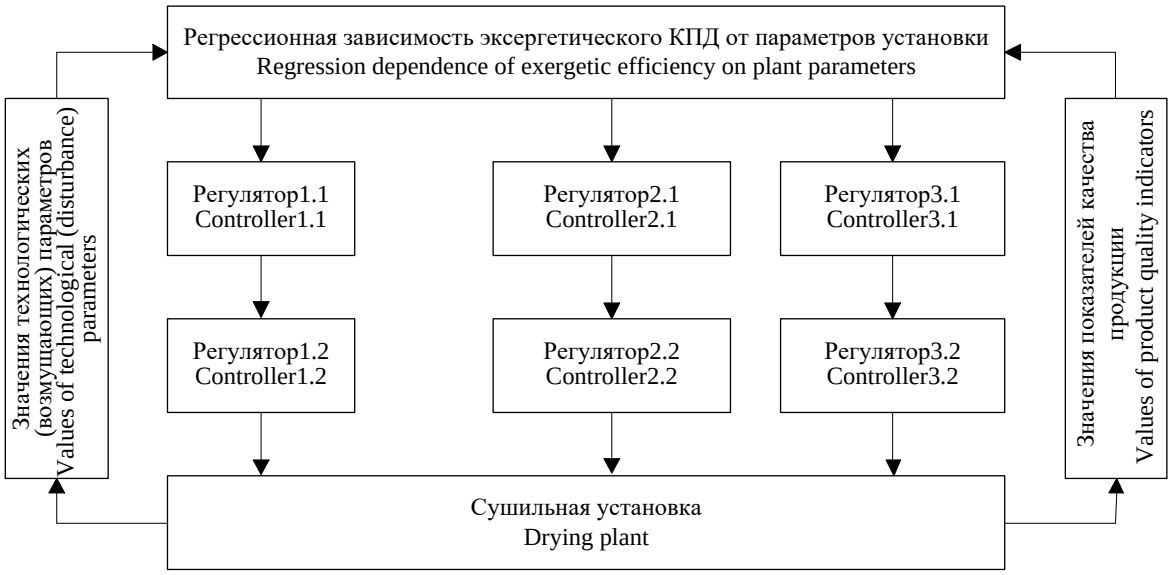


Рисунок 2. Структурная схема системы управления сушильной установкой

Figure 2. Block diagram of the drying unit control

При управлении сушильной установкой как многомерным объектом на основе регрессионной зависимости эксергетического КПД от параметров установки предлагается применять следующие регуляторы:

– расхода топливного газа (Р1.1);

– соотношения топливный газ/воздух (Р1.2);

– температуры сушильного агента на входе (Р2.1);

– расхода рециркулирующего сушильного агента (Р2.2);

– температуры смешанных продуктов сгорания (Р31.1);

– расхода рециркулирующих продуктов сгорания (Р3.2).

Заключение

Эксергетический КПД учитывает необратимость процессов горения, тепломассопереноса. Полезные затраты эксергии на испарение влаги имеют низкое значение. Повышение эффективности работы установки может быть связано с определением оптимальных параметров работы газовой топки и сушильной камеры, таких как расход топливного газа, коэффициент избытка воздуха, температура сушильного агента на входе в сушильную камеру, температуры смешанных продуктов сгорания. При этом необходимо учитывать ограничения на показатели качества выходного продукта (влажность) и наличие возмущающих факторов (влажность поступающей суспензии). Дальнейшие исследования могут быть направлены на детализацию расчетов по приведенным шагам предлагаемой методики, анализ эксергетических потерь, решение задачи многокритериальной оптимизации и программную разработку алгоритмов управления сушильной установкой.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение № 9/2025 ПД-ВШН).

Литература

1 Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии. М.: Химия, 1992. 204 с.

2 Луканин П.В., Казаков В.Г., Самойлов В.Н. Эксергетический анализ сушильной части бумагоделательной машины // Промышленная энергетика. 2011. № 1. С. 35–38.

3 Rudobashta S.P., Zueva G.A., Babicheva E.L. Кинетический расчет сушилки периодического действия с псевдоожиженным слоем // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 6. С. 109–118. doi: 10.6060/ivkkt.20246706.7065

4 Silva S.R., da Costa Jr E.F., Sarrouh B., da Costa A.O.S. Exergetic analysis and optimization of process variables in xylitol production: Maximizing efficiency and sustainability in biotechnological processes // Bioresource Technology. 2024. V. 391. P. 129910. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129910

5 Пахомов А.Н., Гатапова Н.Ц., Пахомова Ю.В. Использование алгоритма выделения слоев в расчете кинетики сушки дисперсных продуктов на подложках // Вестник Тамбовского ГТУ. 2022. Т. 28. № 2. С. 260–268.

6 Тугашова Л.Г., Затонский А.В. Снижение энергетических затрат при управлении установкой ректификации нефти // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20. № 1. С. 120–132.

7 Тугашова Л.Г. Оптимизация процесса ректификации нефти по критерию отбора светлых нефтепродуктов // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76. № 8. С. 347–352.

8 Мосюрова А.В., Меньшутина Н.В. Последние достижения в области распылительной сушки // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 207–216. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-207-216

9 Максименко Ю.А., Неваленная А.А., Пшеничная Н.Э., Теличкин Р.С. Инновационные решения для совершенствования конструкции распылительной сушильной установки // Современная наука и инновации. 2020. № 2. С. 61–65. doi: 10.33236/2307-910X-2020-2-30-57-60

10 Samborska K., Poozesh S., Barańska A. et al. Innovations in spray drying process for food and pharma industries // Journal of Food Engineering. 2022. V. 321. P. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960

11 Lei Z., O'Neill T., Langrish T. The Application of Pinch Technology to a Novel Closed-Loop Spray Drying System with a Condenser and Reheater // Entropy. 2024. V. 26. № 9. P. 809. doi: 10.3390/e26090809

12 Patel S.K., Gupta A.K., Bade M.H. Primary energy and exergy analysis of a spray dryer for the application of industrial effluents: a case study // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2022. V. 39. № 1. P. 251–272. doi: 10.1007/s43153-021-00197-0

13 Zeng Z., Li B., Han C. et al. An Exergoeconomic Analysis of a Gas-Type Industrial Drying System of Black Tea // Entropy. 2022. V. 24. № 5. P. 655. doi: 10.3390/e24050655

14 Johnson P.W., Langrish T.A.G. Interpreting Exergy Analysis as Applied to Spray Drying Systems // International Journal of Exergy. 2020. V. 31. № 2. P. 120–149. doi: 10.1504/IJEX.2020.105479

15 Lei Z., Langrish T. Energy and exergy analysis for a laboratory-scale closed-loop spray drying system: Experiments and simulations // Drying Technology. 2024. V. 43. № 1–2. P. 228–247. doi: 10.1080/07373937.2024.2387840

16 Poozesh S., Karam M., Akafuah N., Wang Y. Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 170. P. 121010. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121010

17 Роднищев С.В., Дмитриев Д.В., Бакин И.А. и др. Оптимизация режимов сушки семян киноа в барабанной сушилке с канальной насадкой // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 95–105. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-95-105

18 Шевцов А.А., Ткач В.В. Вычислительный эксперимент в создании системы виртуального проектирования барабанных сушилок с тепловым насосом // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23

19 Гришко Б.М., Трубаев П.А. Практикум по расчету горения топлива: учебное пособие. Вологда; М.: Инфра Инженерия, 2023. 140 с.

20 Эрдман С.В. Техническая термодинамика и теплотехника: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2006. 87 с.

21 Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984. 80 с.

22 Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.

References

1 Sazhin B.S., Bulekov A.P. Exergetic Method in Chemical Technology. Moscow: Khimiya, 1992. 204 p. (in Russian).

2 Lukanin P.V., Kazakov V.G., Samoilov V.N. Exergetic Analysis of the Drying Section of a Paper Machine. Industrial Power Engineering. 2011. no. 1. pp. 35–38. (in Russian).

3 Rudobashta S.P., Zueva G.A., Babicheva E.L. Kinetic Calculation of a Batch Fluidized Bed Dryer. News of Universities. Chemistry and Chemical Technology. 2024. vol. 67. no. 6. pp. 109–118. doi: 10.6060/ivkkt.20246706.7065 (in Russian).

4 Silva S.R., da Costa Jr E.F., Sarrouh B., da Costa A.O.S. Exergetic analysis and optimization of process variables in xylitol production: Maximizing efficiency and sustainability in biotechnological processes. Bioresource Technology. 2024. vol. 391. article 129910. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129910.

5 Pakhomov A.N., Gatapova N.T., Pakhomova Yu.V. Using the Layer Extraction Algorithm in Calculating the Drying Kinetics of Disperse Products on Substrates. Bulletin of Tambov State Technical University. 2022. vol. 28. no. 2. pp. 260–268. (in Russian).

6 Tugashova L.G., Zatonsky A.V. Reduction of Energy Costs in Controlling an Oil Rectification Unit. Bulletin of SUSU. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics. 2020. vol. 20. no. 1. pp. 120–132. (in Russian).

7 Tugashova L.G. Optimization of the Oil Rectification Process According to the Criterion of Light Oil Products Recovery. Automation. Modern Technologies. 2022. vol. 76. no. 8. pp. 347–352. (in Russian).

8 Mosyurova A.V., Menshutina N.V. Recent Advances in Spray Drying. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 207–216. doi: 10.20914/2310-1202-2025-3-207-216 (in Russian).

9 Maksimenko Yu.A., Nevalennaya A.A., Pshenichnaya N.E., Telichkin R.S. Innovative Solutions for Improving the Design of a Spray Drying Plant. Modern Science and Innovation. 2020. no. 2. pp. 61–65. doi: 10.33236/2307-910X-2020-2-30-57-60 (in Russian).

10 Samborska K., Poozesh S., Barańska A. et al. Innovations in spray drying process for food and pharma industries. Journal of Food Engineering. 2022. vol. 321. article 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960.

11 Lei Z., O'Neill T., Langrish T. The Application of Pinch Technology to a Novel Closed-Loop Spray Drying System with a Condenser and Reheater. Entropy. 2024. vol. 26. no. 9. article 809. doi: 10.3390/e26090809.

12 Patel S.K., Gupta A.K., Bade M.H. Primary energy and exergy analysis of a spray dryer for the application of industrial effluents: a case study. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2022. vol. 39. no. 1. pp. 251–272. doi: 10.1007/s43153-021-00197-0.

13 Zeng Z., Li B., Han C. et al. An Exergoeconomic Analysis of a Gas-Type Industrial Drying System of Black Tea. Entropy. 2022. vol. 24. no. 5. article 655. doi: 10.3390/e24050655.

14 Johnson P.W., Langrish T.A.G. Interpreting Exergy Analysis as Applied to Spray Drying Systems. International Journal of Exergy. 2020. vol. 31. no. 2. pp. 120–149. doi: 10.1504/IJEX.2020.105479.

15 Lei Z., Langrish T. Energy and exergy analysis for a laboratory-scale closed-loop spray drying system: Experiments and simulations. Drying Technology. 2024. vol. 43. no. 1–2. pp. 228–247. doi: 10.1080/07373937.2024.2387840.

16 Poozesh S., Karam M., Akafuah N., Wang Y. Integrating a model predictive control into a spray dryer simulator for a closed-loop control strategy. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. vol. 170. article 121010. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121010.

17 Rodnishchev S.V., Dmitriev D.V., Bakin I.A. et al. Optimization of Drying Modes of Quinoa Seeds in a Drum Dryer with a Channel Nozzle. Bulletin of VSUET. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 95–105. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-95-105 (in Russian).

18 Shevtsov A.A., Tkach V.V. Computational Experiment in the Creation of a Virtual Design System for Drum Dryers with a Heat Pump. Bulletin of VSUET. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 15–23. doi: 10.20914/2310-1202-2024-3-15-23 (in Russian).

19 Grishko B.M., Trubaev P.A. Workshop on Fuel Combustion Calculation: A Textbook. Vologda; Moscow: Infra Inzheneriya, 2023. 140 p. (in Russian).

20 Erdman S.V. Technical Thermodynamics and Heat Engineering: A Textbook. Tomsk: TPU, 2006. 87 p. (in Russian).

21 Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. Thermodynamic Properties of Water and Water Vapor: A Reference Book. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 80 p. (in Russian).

22 Bundy B. Optimization Methods. An Introductory Course. Translated from English. Moscow: Radio i svyaz', 1988. 128 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Лариса Г. Тугашова к.т.н., доцент, кафедра автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», ул. Советская, 186а, г. Альметьевск, 423462, Россия, tugashova@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-9331-3142

Вклад авторов

Лариса Г. Тугашова обзор литературных источников, методика и проведение эксперимента, выполнение расчетов, написание и корректировка рукописи.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Larisa G. Tugashova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of automation and information technologies, Almetyevsk State Technological University «Higher School of Petroleum», Sovetskaya st., 186a, Almetievsk, 423462, Russia, tugashova@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0001-9331-3142

Contribution

Larisa G. Tugashova literature review, experimental procedure, computational analysis, manuscript preparation and editing

Conflict of interest

The author declare no conflict of interest.

Поступила 11/01/2026	**После редакции** 18/01/2026	**Принята в печать** 20/02/2026
Received 11/01/2026	**Accepted in revised** 18/01/2026	**Accepted** 20/02/2026