

УДК 66.047.57

## Анализ работы сушильного агрегата

д-р техн. наук Громцев С.А. [grom\\_doctor@mail.ru](mailto:grom_doctor@mail.ru)

Громцев А.С. [aleex\\_g@mail.ru](mailto:aleex_g@mail.ru)

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО  
Институт холода и биотехнологий  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

канд. техн. наук Асанкулов Н.А. [n.asankulov@mail.ru](mailto:n.asankulov@mail.ru)

*Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати  
010000, Республика Казахстан, Тараз, ул.Толе би, 60*

***Предложена оптимизация сушильного барабанного агрегата на основе термодинамического и эксергетического методов. Получены уравнения, характеризующие взаимосвязь термодинамических параметров семян и сушильного агента, и позволяющие, при заданных параметрах сушильного агента рассчитать выходные параметры семян для любого момента времени процесса сушки.***

***Ключевые слова:*** сушка, барабанный сушильный агрегат, семена, эксергия, эксергетический баланс, оптимизация сушильных установок.

---

## The analysis of work of the unit for drying

*D.Sc. Gromtsev S.A., Gromtsev A.S.*

*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics*

*Institute of Refrigeration and Biotechnology  
191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

*Ph.D Asankulov N.A.*

*Taraz State University named after M. Kh Dulaty*

*010000, Taraz. Tole Bi str., 60*

***Proposed optimization of the drying drum unit on the basis of thermodynamic and exergic methods. We derive the equations describing the relationship of the thermodynamic parameters of seeds and the drying agent, and allowing, for given parameters of a drying agent to calculate the output parameters of seeds for any time of the drying process.***

***Key words:*** drying, drum drying plant, seed, exergy, exergy balance, optimization of dryers.

---

Методика оптимизации должна использовать единую меру оценки различных форм передачи энергии. В качестве такой величины целесообразно использовать эксергию, получившую весьма широкое применение. Так как сушильная установка является сложным энергетическим комплексом, все элементы которого, как и параметры, определяющие режим их работы, взаимосвязаны, процесс оптимизации должен начинаться с анализа режима работы установки в целом. На этом этапе оптимизационного процесса должны использоваться характеристики отдельных элементов сушильного оборудования. Ограничительными условиями при этом являются технологические и экономические требования, предъявляемые в данном производстве к сушке семян. Эффективность работы, рассматриваемого агрегата зависит от его технологических параметров. Для оценки качественного и количественного влияния этих факторов на эффективность работы сушильного барабанного агрегата, используем его материальный, тепловой и эксергетический балансы (рисунок 1).

Материальный баланс:

$$M_B + M_C + M'_B = M''_{\text{из1}} + M''_C + M''_{\text{п1}} + M''_{\text{п2}} ; \quad (1)$$

энергетические балансы записывают соответственно:

$$Q_B + Q_C + Q'_B + Q_{M1} + Q_{M2} = Q''_{вх1} + Q''_C + Q''_{M1} + Q''_{M2} + \sum Q_{пот} \quad ; \quad (2)$$

эксергетический баланс:

$$E_B + E_C + E'_B + E_{M1} + E_{M2} = E''_{вх1} + E'_C + E''_{M1} + \sum \Delta E_{пот} \quad , \quad (3)$$

где  $M_B, M_C, M'_$  - соответственно массы воздуха для сушки, семян, топлива и воздуха для смешения, поступающего в агрегат, кг на 1 кг испаренной влаги;  $M'_{...1}, M'_, M'_{...}$  - соответственно массы воздуха, уходящего после сушки, семян после сушки, пыли после первого и второго циклонов;  $Q_B, Q_C, Q'_, Q_{M1}, Q_{M2}$  - соответственно тепло, вносимое воздухом для сушки, семенами, воздухом для смешения и тепло, выделяемое при работе

нагревателя и вентилятора;  $Q''_{вх1}, Q''_C, Q''_{M1}, Q''_{M2}, \sum Q_{пот}$  - соответственно тепло воздуха, уходящего после сушки, семян после сушки, пыли семян после циклона, а также сумма тепла, теряемое через корпуса установок;

$E_B, E'_B, E_C, E_{M1}, E_{M2}$  - соответственно эксергии, вносимые воздухом для сушки, воздухом для смешения, семенами и эксергии, выделяемые при

работе нагревателя и вентилятора;  $E''_{вх1}, E'_C, E''_{M1}, \sum \Delta E_{пот}$  - соответственно эксергии воздуха, уходящего после сушки, семян после сушки, пыли семян после циклона, а также сумма эксергии, теряемая через корпуса установок, кДж на 1 кг испаренной влаги.

Учитывая, что сушка является и тепло-массообменным процессом, они описываются системой уравнений, характеризующих тепло - массообмен между взаимодействующими фазами. В предлагаемом сушильном барабанном агрегате время сушки семян обычно достаточно для достижения требуемых конечного влагосодержания при сушке, т.е. может быть описан балансовыми уравнениями.

При этом в качестве показателя, характеризующего аэродинамическую активность сушильного барабана, используется коэффициент межфазной теплоотдачи с учетом тепла, идущего на испарение влаги.

Потоки тепла, влаги и массы (пыль), которыми высушиваемые семенами обменивается с теплоносителем, могут быть оценены с помощью коэффициентов тепло - и массоотдачи. В этом случае кинетические закономерности процесса описываются уравнениями следующего вида:

уравнение теплообмена:

$$M_M \cdot (H_M'' - H_M') = \alpha \cdot a_V \cdot (t_{\Gamma}'' - t_M'') \cdot V + i_{\Gamma} \cdot \beta \cdot a_V \cdot (X_{\Gamma}^P - X_{\Gamma}'') \cdot V ; \quad (4)$$

уравнение массообмена:

$$M_M \cdot (W_M'' - W_M') = \beta \cdot a_V \cdot (X_{\Gamma}^P - X_{\Gamma}'') \cdot V , \quad (5)$$

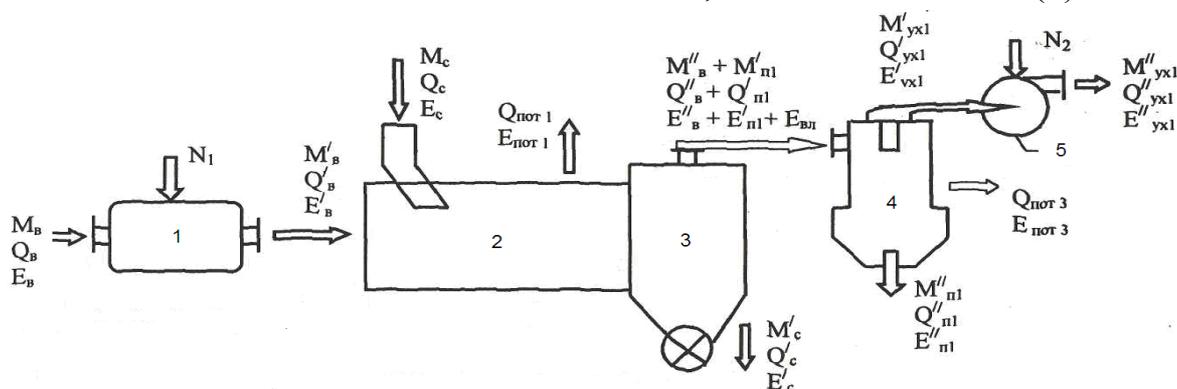


Рис. 1. Схема материального, теплового и эксергетического потоков в барабанном сушильном агрегате

где где  $W_M', W_M''$  - влажность семян на входе и на выходе из сушильного барабана;  $X_{\Gamma}''$  - влагосодержание теплоносителя на выходе из сушильного барабана;  $M_M', M_{\Gamma}$  - массовые расходы семян и сушильного агента;  $H_M', H_M''$  - энтальпии семян на входе и на выходе из сушильного

барабана;  $\alpha$ ,  $\beta$  - коэффициенты тепло- и массоотдачи;  $t_{Г}^{\#}$ ,  $t_{М}^{\#}$  - температура теплоносителя и семян на выходе из барабана;  $a_v$  - удельная, приходящаяся на единицу объема барабана, поверхность контакта взаимодействующих фаз;  $X_{Г}^{\#}$  - влагосодержание сушильного агента, находящегося в термодинамическом равновесии с обрабатываемым семенами;  $i_{П}$  - энтальпия испаренной влаги.

Кинетические уравнения (4) и (5) описывают процессы тепло- и массопереноса в сушильном барабане и справедливы в условиях, когда аэродинамическая обстановка в ней соответствует модели идеального смешения. Рассматривая сушильный агент как смесь абсолютно сухого газа и содержащего в нем водяного пара, по закону адитивности, можно записать следующее соотношение:

$$M_{М} \cdot (H_{М}^{\#} - H_{М}^{\prime}) = \left( \frac{\alpha \cdot a_v}{C_p} \right) \cdot \left[ (H_{Г,П}^{\#} - H_{Г,П}^{\prime}) + i_{П} (\beta \cdot C_p \cdot a_v - 1) \cdot (X_{Г,П}^{\#} - X_{Г,П}^{\prime}) \right] \cdot V, \quad (6)$$

где  $C_p$  – удельная массовая изобарная теплоемкость абсолютно сухого газа.

Вводим безразмерные обобщенные переменные, используемые при описании процесса сушки /1/:

$$N = \frac{\beta \cdot a_v}{M_{М}}; \quad Le = \frac{\beta \cdot C_p}{\alpha}; \quad g_{ГМ} = \frac{M_{Г}}{M_{М}}. \quad (7)$$

Введя эти обобщенные безразмерные переменные в соотношения (4) –(5), получим систему уравнений, описывающих процесс сушки в барабане:

$$\left. \begin{aligned} H_{М}^{\#} - H_{М}^{\prime} &= \frac{g_{ГМ} \cdot N}{Le} \cdot \left[ H_{Г}^{\#} - H_{Г}^{\prime} + i_{П} \cdot (Le - 1) \cdot (X_{Г}^{\#} - X_{Г}^{\prime}) \right] \\ W_{М}^{\#} - W_{М}^{\prime} &= g_{ГМ} \cdot N \cdot (X_{Г}^{\#} - X_{Г}^{\prime}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система уравнений (8) позволяет выразить термодинамические параметры сушильного агента на выходе из барабана через переменные:  $H_M$ ,  $W_M$ , характеризующее состояние высушиваемых семян, и безразмерную переменную:  $g_{rM} = H_{rM} \cdot \tau$ , где  $\tau$  - время пребывания семян в барабане. Все остальные параметры в уравнениях этой системы постоянны при заданных условиях сушки. Для вычисления параметров сушильного агента необходимо экспериментальным путем определить коэффициенты тепло- и массоотдачи.

Из выше изложенного следует, что для непрерывного процесса сушки уравнения (8) можно записать в дифференциальной форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH_M}{d\tau} &= \frac{N}{N+Le} \cdot \left[ H'_r - H_r^p + \frac{Le-1}{N+1} \cdot i_H \cdot (X_r^n - X_r^p) \right] \\ \frac{dW_M}{d\tau} &= \frac{N}{N+1} \cdot (X_r^n - X_r^p) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Полученные уравнения (9) характеризуют взаимосвязь термодинамических параметров семян и сушильного агента, и позволяют, при заданных параметрах сушильного агента рассчитать выходные параметры семян для любого момента времени процесса сушки.

На основе уравнения (9) строятся расчетные зависимости  $H_M/H_{M0} = f(\tau)$  и  $W_M/W_{M0} = f(\tau)$  для любых семян сельскохозяйственных культур в сушильном барабане и определяют оптимальное время сушки.

Список литературы:

1. Бродянский В.М., Фраштер В., Михалек К. Эксергетический метод и его применение.- М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Громцев С.А., Антуфьев В.Т. Математическая модель вепольной теплоотдачи. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. СПб., 2009.