

3. З.В. Ловкис Теоретический анализ взаимодействия эллипсного рабочего органа смесителя со смешиваемой средой/ Ловкис З.В., Садовская А.В.// Пищевая промышленность: наука и технологии.–2011.– №3(13).–С. 88–95.
4. Надежин, Е. С. Интенсификация режимов работы смесителей лопастного типа для получения тиксотропных смесей/ дисс... канд. техн. наук: 05.02.13/ Е. С. Надежин .–Тула, 2006.–182с.

УДК 66.47:378.147

## УПРОЩЕННЫЙ ВАРИАНТ ПРИМЕНЕНИЯ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛОК

Калишук Д.Г., канд. техн. наук, доцент,  
Саевич Н.П., канд. техн. наук

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

*Дан анализ сущности аналитического и графоаналитического методов расчета конвективных сушилок. Представлен критический обзор изложения этих методов в научной и учебной литературе. Описан алгоритм графоаналитического метода, упрощающий его практическое применение и позволяющий выполнить графические построения с большей точностью.*

*The analysis of the essence of the analytical methods and graph-analytical calculation of convective dryers. A critical review of the presentation of these techniques in scientific and educational literature. An algorithm for graph-analytical method, which simplifies its practical application, and allows you to run graphical representations with greater accuracy.*

**Ключевые слова:** сушка, энтальпия, температура, относительная влажность, диаграмма Рамзина, конвективная сушилка.

Процесс термической сушки является одним из распространенных и значимых процессов химической, пищевой и других отраслях промышленности, позволяющий достичь на конечной стадии технологической цепочки заданных качеств производимого продукта. Поэтому вопросы теории процесса, его аппаратно-технологического оформления, расчета, моделирования и оптимизации сушильных установок и аппаратов являются актуальными и востребованными. При расчетах сушильных установок любого типа, в том числе конвективных, подлежат определению расходы сушильного агента (газовой фазы, с помощью которой от высушиваемого материала отводится испаренная влага)  $L$ , кг/с, и тепла на проведение процесса  $Q$ , Вт. С использованием значений указанных параметров для конвективных сушилок ведется расчет размеров активной зоны аппарата (сушильной камеры), подбирается и рассчитывается вспомогательное оборудование (топки при сушке топочными газами, калориферы при сушке воздухом, вентиляторы, дымососы, газоочистные устройства и т.д.), рассчитываются показатели энергетической эффективности. Определение значения  $J_2$  и  $x_2$  осуществляют при совместном решении уравнений материального и теплового баланса по методике, разработанной и опубликованной профессором Рамзиным Л. К. в 1930 году [1]. Изложение методики профессора Рамзина Л. К., как правило, в усеченном объеме, вошло в большинство классических монографий по сушке, а также учебников, учебных пособий и справочной литературы по процессам и аппаратам химической технологии, теплотехническим агрегатам и установкам, промышленной теплотехнике [2–20]. Данная методика и на сегодняшний день не потеряла своей актуальности и отражена в современных справочниках, учебниках, монографиях и пособиях, примерами которых могут служить [21–25].

Рамзиным Л. К. предложены аналитический и графоаналитический методы расчета. Ниже приведено краткое изложение основных положений этих методов для наименее сложного варианта организации сушильного процесса, получившего в научно-технической литературе наименование простого. При простом сушильном варианте предусмотрен однократный, без частичной рециркуляции, проход сушильного агента через сушильную камеру. Нагрев сушильного агента при этом осуществляется однократно перед подачей в сушильную камеру, а распределенный ввод его в камеру отсутствует.

При расчетах как с использованием аналитического, так и графоаналитического метода базовой является следующая система уравнений:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1}; \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{J_1 - J_2}{x_2 - x_1}; \quad (2)$$

$$Q = L(J_1 - J_0), \quad (3)$$

где  $W$  — расход влаги, удаляемой при сушке, кг/с;

$x_2$  и  $x_1$  — влагосодержание сушильного агента на выходе из сушильной камеры и на входе в нее соответственно, кг влаги/кг сушильного агента;

$\Delta$  — удельные потери тепла при сушке, Дж/кг влаги;

$J_1$  и  $J_2$  — удельные энтальпии сушильного агента на входе в сушильную камеру и на выходе из нее соответственно, Дж/кг;

$J_0$  — удельная энтальпия сушильного агента на входе его в калорифер (топку) сушильной установки, Дж/кг.

Величины  $x_1, x_2, J_0, J_1, J_2$  приведены в расчете на 1 кг сухого сушильного агента. Значение  $\Delta$  рассчитывают по уравнению

$$\Delta = q_{\text{пот}} + q_{\text{мат}} + q_{\text{тр}} - q_{\text{вл}}, \quad (4)$$

где  $q_{\text{пот}}, q_{\text{мат}}$  и  $q_{\text{тр}}$  — удельные потери тепла от ограждающих конструкций сушильной камеры в окружающую среду, удельные потери его с материалом и транспортными устройствами соответственно, Дж/кг влаги;

$q_{\text{вл}}$  — удельное количество тепла, внесенного в сушильную камеру влагой, поступившей с исходным материалом и удаленной впоследствии из него при сушке, Дж/кг влаги.

Величину  $q_{\text{пот}}$  обычно принимают в долях от удельного тепла, израсходованного в сушилке непосредственно на испарение влаги. Значения  $q_{\text{мат}}, q_{\text{тр}}, q_{\text{вл}}$  рассчитывают следующим образом:

$$q_{\text{мат}} = \frac{G_{\text{к}}}{W} c_{\text{к}} (\vartheta_2 - \vartheta_1); \quad (5)$$

$$q_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{тр}}}{W} c_{\text{тр}} (\vartheta_2 - \vartheta_1); \quad (6)$$

$$q_{\text{вл}} = c_{\text{вл}} \vartheta_1, \quad (7)$$

где  $G_{\text{к}}$  и  $G_{\text{тр}}$  — расходы высушенного материала и транспортных устройств соответственно, кг/с;

$c_{\text{к}}, c_{\text{тр}}$  и  $c_{\text{вл}}$  — удельные теплоемкости высушенного материала, транспортных устройств и влаги соответственно, Дж/(кг·°C);

$\vartheta_2$  и  $\vartheta_1$  — температуры материала на выходе и входе в сушилку соответственно, °C.

При проведении расчетов задаются, основываясь на практических знаниях, одним из параметров сушильного агента на выходе из сушильной камеры: температурой  $t_2$ , °C, или относительной влажностью  $\varphi_2$ . Но даже при дополнении системы уравнений (1–7) зависимостями, устанавливающими взаимосвязь удельной энтальпии сушильного агента на выходе его из сушильной камеры  $J_2$  с температурой  $t_2$  или относительной влажностью  $\varphi_2$ , аналитическое решение невозможно без применения метода последовательных приближений. Это обусловлено одновременной взаимосвязью искомых величин  $J_2$  и  $x_2$  друг с другом, а также с  $t_2$  и  $\varphi_2$ . Число неизвестных в системе уравнений всегда превышает число уравнений в ней.

Алгоритм аналитического расчета сложен, а сам расчет — весьма трудоемок. Поэтому в инженерной практике получил распространение графоаналитический метод расчета конвективных сушилок. При сво-

ей относительной простоте и небольшой трудоемкости он обеспечивает приемлемую точность проектных расчетов.

Графоаналитический метод, как и аналитический, основан на использовании системы уравнений (1–7). Но при его использовании истинные значения величин  $J_2$  и  $x_2$  определяются методом приближений графически по диаграмме состояния влажного воздуха ( $J-x$ -диаграмме, диаграмме Рамзина). Указанная диаграмма разработана Рамзиным Л. К. в 1918 году и дает взаимосвязь параметров влажного воздуха: температуры  $t$ , относительной влажности  $\phi$ , удельной энтальпии  $J$ , влагосодержания  $x$ , парциального давления паров влаги  $p_{п}$ , температур точки росы  $t_p$  и мокрого термометра  $t_{мт}$ . При использовании графоаналитического метода Рамзиным Л. К. введено понятие теоретической сушилки (адиабатной, идеальной). Для идеальной сушилки  $q_{пот} = q_{мат} = q_{тр} = q_{вл} = 0$ , а следовательно и  $\Delta = 0$ . В таком случае согласно уравнению (2)  $J_2 = J_1$ , т.е. удельная энтальпия сушильного агента в сушильной камере не изменяется, несмотря на падение его температуры. Принимается, что тепло, выделяющееся при охлаждении сушильного агента, расходуется только на испарение влаги. Соответственно, оно возвращается сушильному агенту в эквивалентном количестве с парами влаги.

В работе Рамзина Л. К. [1] подробно описаны процедуры графоаналитического метода. Им дано теоретическое обоснование по физическим принципам процессов изменения параметров влажного сушильного агента, отображаемых на  $J-x$ -диаграмме. При этом доказана адекватность предлагаемых геометрических построений и измерений указанным физическим принципам. Однако материал статьи сложен для восприятия человеку, не имеющему специальных научных знаний. Кроме того, с точки зрения авторов, Рамзиным Л. К. предлагается выполнить некоторые действия, не представляющие ценности при практическом применении графоаналитического метода. К ним, в частности, относится построение определенных отрезков на диаграмме с последующим масштабированием. Их функция – продемонстрировать корректность, действенность метода, что вполне обоснованно для научной работы. В примере в статье не совсем удачно показана точка для выполнения первой итерации – произвольно выбранного для первого приближения влагосодержания  $x$ , т.к. при этом не обеспечивается максимально возможная точность построений на диаграмме.

В учебниках, справочниках, монографиях, пособиях графоаналитический метод изложен в виде, усеченном по сравнению с авторским вариантом. Вследствие этого успешное восприятие его, как правило, затруднено, особенно студентами в процессе обучения в вузе. Кроме того в ряде книг при изложении метода допущены неточности. Данное заключение сделано авторами на основании анализа и изучения более ста книг, в которых рассматриваются вопросы сушки, и многолетнего опыта преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии».

Нами предлагается проводить графоаналитический расчет конвективных сушилок в следующей последовательности:

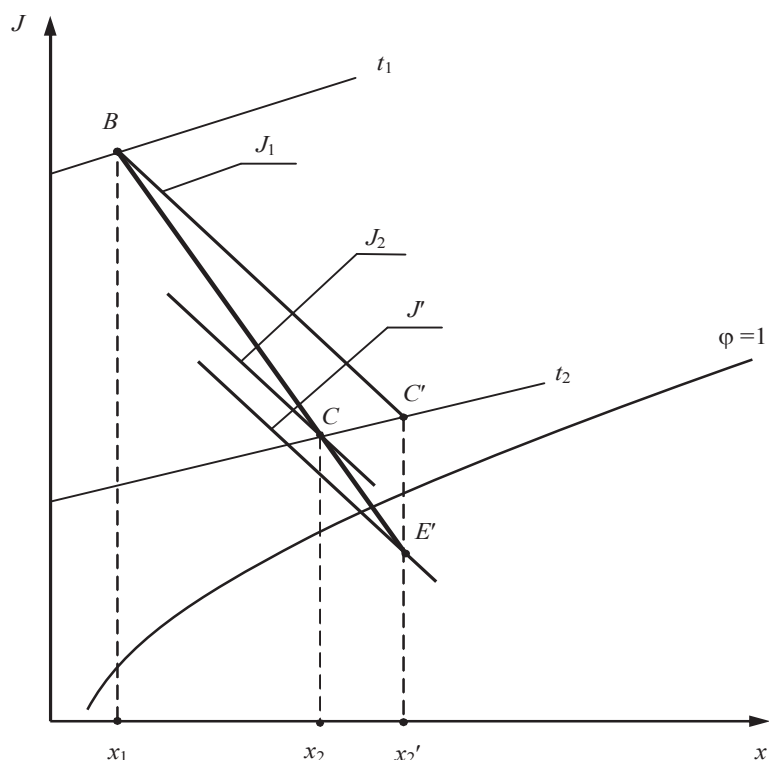
- 1) рассчитать  $W$  по уравнениям материального баланса по высушиваемому материалу;
- 2) выбрать для сушильного агента на входе в сушильную камеру его температуру  $t_1$  (исходя из свойств высушиваемого материала и др. показателей), определить для него  $J_1$  и  $x_1$ ;
- 3) задаться для сушильного агента, покидающего сушильную камеру, значением  $\phi_2$  или  $t_2$ ;
- 4) нанести на  $J-x$ -диаграмму точку  $B$  с координатами  $J_1$  и  $x_1$  (см. рисунок 1);
- 5) отобразить на  $J-x$ -диаграмме отрезок  $BC'$ , совпадающий на ней с линией значений удельной энтальпии  $J_1$  – рабочую линию теоретической сушилки (в примере на рисунке точка  $C'$  на изотерме  $t_2$ , т.е. по п. 3 принята  $t_2$ );
- 6) произвести расчет значений  $q_{пот}$ ,  $q_{мат}$ ,  $q_{тр}$ ,  $q_{вл}$  и  $\Delta$ , используя уравнения (4–7);
- 7) определить на  $J-x$ -диаграмме значение влагосодержания  $x'_2$ , как одну из координат точки  $C'$  (влагосодержание сушильного агента на выходе из теоретической сушилки);
- 8) в уравнении (2)  $x_2$  и  $J_2$  заменить на  $x'_2$  и  $J'$  соответственно, рассчитать величину удельной энтальпии  $J'$ , соответствующую  $x'_2$ ;
- 9) на  $J-x$ -диаграмме нанести точку  $E'$  с координатами  $x'_2$  и  $J'$ , затем соединить точки  $B$  и  $E'$  отрезком прямой;

10) отметить точку  $C$  – точку пересечения отрезка  $BE'$  с изотермой  $t_2$  (при этом получен отрезок  $BC$  – рабочая линия действительной сушилки; согласно обоснованиям Рамзина Л. К. [1] изменение параметров сушильного агента в действительной сушилке описывается совокупностью точек, лежащих на отрезке  $BE'$ );

11) для точки  $C$  определить координаты  $J_2$  и  $x_2$ , т.е. таким образом определяются параметры сушильного агента на выходе из сушильной камеры;

12) подставить в уравнение (2) значение  $x_2$ , полученное в результате действий по предыдущему пункту, рассчитать с целью проверки точности  $J_2$ ;

13) сравнить сходимость значений  $J_2$ , определенных при выполнении п.п. 11 и 12 настоящего алгоритма.



**Рис. 1 – К определению параметров сушильного агента на выходе из сушилки**

При выполнении действий по описанному выше алгоритму число расчетных и графических процедур, по сравнению с изложенным в статье [1], снижается. Это достигается за счет того, что исключаются построения на  $J-x$ -диаграмме ряда отрезков, их измерение и масштабирование. При этом корректность конечных результатов не снижается. Кроме того при использовании наших рекомендаций точность построений, а следовательно, и расчетов повышается. Это обусловлено более точным отображением отрезка, частью которого является рабочая линия действительной сушилки (см. рекомендации по определению  $x'_2$ , п. 7 алгоритма).

Предлагаемые нами усовершенствования графоаналитического метода расчета конвективных сушилок были апробированы в учебном процессе по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии». Качество усвоения студентами графоаналитического метода расчета конвективных сушилок в частности оценено преподавателями в ходе курсового проектирования. После внедрения наших усовершенствований метода в учебный процесс отмечено, что объем консультативной помощи студентам по указанному вопросу снизился примерно вдвое. При этом качество выполненных студентами расчетов повысилось.

**Выводы.** Применение усовершенствований графоаналитического метода расчета конвективных сушилок повышает его усвоение и качество использования при проведении практических расчетов. При

этом повышается точность результатов, получаемых при выполнении графических процедур. Данные усовершенствования метода рекомендуются к практическому применению в инженерной деятельности при технологическом проектировании конвективных сушилок, а также в учебном процессе при обучении студентов по теме «Термическая сушка».

### Література

1. Рамзин, Л.К. Расчет сушилок и  $J-d$ -диаграмма. Способ построения  $J-d$ -диаграммы и вспомогательные таблицы для влажного воздуха / Л.К. Рамзин, М.Ю. Лурье. – М.: Из-во ВТИ, 1930. – 48 с.
2. Лурье, М.Ю. Сушильное дело / М.Ю. Лурье. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 711 с.
3. Филоненко, Г.К. Сушильные установки / Г.К. Филоненко, П.Д. Лебедев. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 264 с.
4. Лыков, М.В. Сушка распылением / М.В. Лыков. – М.: Пищепромиздат, 1955. – 203 с.
5. Теплотехнический справочник / Под общ. ред. С.Г. Герасимова. В 2-х т. Т.2. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 672 с.
6. Лебедев, П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П.Д. Лебедев. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 319 с.
7. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности / Под ред. Д.Б. Гинзбурга и В.Н. Зилина. – М.: Стройиздат, 1964. – 495 с.
8. Левченко, П.В. Расчеты печей и сушилок силикатной промышленности / П.В. Левченко. – М.: Высшая школа, 1968. – 367 с.
9. Романков, П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, И.Б. Рашковская. – М.: Химия, 1968. – 358 с.
10. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М.: Химия, 1968. – 848 с.
11. Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 429 с.
12. Голубков, Б.Н. Теплотехническое оборудование и теплоснабжение промышленных предприятий / Б.Н. Голубков [и др.]. – М.: Энергия, 1972. – 424 с.
13. Лебедев, П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев. – М.: Энергия, 1972. – 320 с.
14. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 750 с.
15. Чернобыльский, И.И. Машины и аппараты химических производств / И.И. Чернобыльский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.
16. Теплотехнический справочник. Т.2. / Под общ. ред. В.М. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
17. Кувшинский, М.Н. Курсовое проектирование по предмету «Процессы и аппараты химической промышленности» / М.Н. Кувшинский, А.П. Соболева. – М.: Высшая школа, 1980. – 223 с.
18. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник. Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 552 с.
19. Гинзбург, А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
20. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
21. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов [и др.]: Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
22. Иоффе, И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии / И.Л. Иоффе. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.
23. Айнштейн, В.Г. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: В 2 кн / В.Г. Айнштейн [и др.]. Кн. 2. М.: Логос, Высшая школа, 2002. – 872 с.
24. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн.: Часть 2. Массообменные процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 368 с.
25. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч.II. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.