

УДК 66.47:378.147.88

Д. Г. Калишук, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);

Н. П. Саевич, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ)

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛОК

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. Отмечено лучшее усвоение студентами усовершенствованного алгоритма графоаналитического метода.

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. Was noted better help students to understand advanced algorithm graph-analytical method.

**Введение.** Глобальной задачей учебного процесса в учреждениях высшего образования является получение его выпускником комплекса знаний, умений и навыков, соответствующих требованиям образовательного стандарта по специальности. Этот комплекс знаний, умений и навыков требует изучения и усвоения ряда дисциплин, предусмотренных учебным планом. При изучении отдельных дисциплин студенту необходимо в первую очередь глубоко и четко овладеть наиболее важными темами и вопросами. При подготовке инженеров-химиков-технологов, инженеров-химиков-экологов, инженеров-механиков специализации «Машины и аппараты химических производств» и некоторых других базовой специальной дисциплиной является «Процессы и аппараты химической технологии (химических производств)». Тема «Термическая сушка» данной дисциплины относится к числу наиболее значимых. При изучении указанной темы рассматриваются вопросы теории процесса, его аппаратно-технологического оформления, а также расчета, моделирования и оптимизации сушильных установок и аппаратов. 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 г. [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 издания [21–25].

**Основная часть.** 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 научнотехнической 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 с использованием как 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 · °С);  $\vartheta_2$  и  $\vartheta_1$  – температуры материала на выходе и входе в сушилку соответственно, °С.

При проведении расчетов задаются, основываясь на практических знаниях, одним из параметров сушильного агента на выходе из сушильной камеры: температурой  $t_2$ , °С, 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  $\varphi_2$ , ана-

литическое 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 весьма сложен, а сам расчет обладает высокой трудоемкостью. Поэтому в учебниках, а также на лекциях по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» аналитический метод излагается на уровне основных рекомендаций к использованию. По указанным причинам, а также из-за необходимости больших затрат времени он не может быть изучен и освоен студентами во время практических и самостоятельных занятий. Поэтому на лекциях излагается и на практических занятиях и при курсовом проектировании закрепляется графоаналитический метод расчета конвективных сушилок как более простой и менее трудоемкий.

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 г. и дает взаимосвязь параметров влажного воздуха: температуры  $t$ , относительной влажности  $\varphi$ , удельной энтальпии  $J$ , влагосодержания  $x$ , парциального давления паров влаги  $p_{\text{п}}$ , температур точки росы  $t_{\text{р}}$  и мокрого термометра  $t_{\text{мт}}$ . При использовании графоаналитического метода Рамзиным Л. К. введено понятие теоретической сушилки (адиабатной, идеальной). Для идеальной сушилки  $q_{\text{пот}} = q_{\text{мат}} = q_{\text{тр}} = q_{\text{вл}} = 0$ , 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  $x$ , так как при этом не обеспечивается максимально возможная точность построений на диаграмме.

В учебниках, справочниках, монографиях, пособиях графоаналитический метод изложен в усеченном по сравнению с авторским вариантом виде. Вследствие этого успешное восприятие его, как правило, затруднено, особенно при изучении студентами. 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) задать для сушильного агента, покидающего сушильную камеру, значением  $\varphi_2$  или  $t_2$ ;

4) нанести на  $J-x$ -диаграмму точку  $B$  с координатами  $J_1$  и  $x_1$  (см. рисунок);

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  $q_{\text{пот}}$ ,  $q_{\text{мат}}$ ,  $q_{\text{тр}}$ ,  $q_{\text{вл}}$  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  $x'_2$ ;

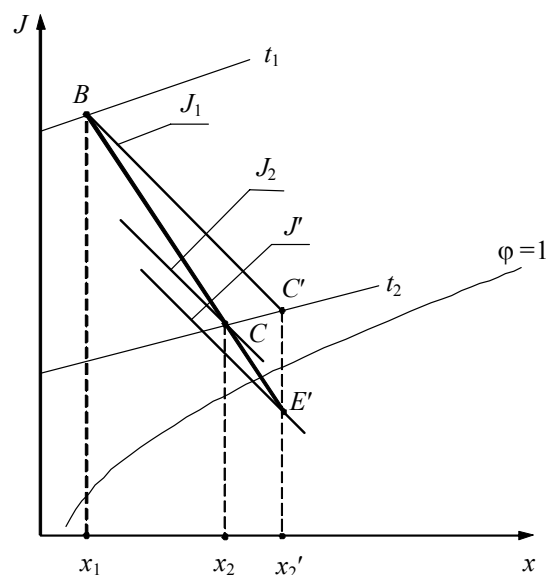
9) на  $J-x$ -диаграмме нанести точку  $E'$  с координатами  $x'_2$  и  $J'$ , затем соединить точки  $B$  и  $E'$  отрезком прямой;

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. 11 и 12 настоящего алгоритма.



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).

Качество усвоения студентами графоаналитического метода расчета конвективных сушилок в наибольшей мере оценивается преподава-

телем 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 усовершенствованной графоаналитического метода расчета конвективных сушилок в учебном процессе повышает его усвоение и качество использования при проведении практических расчетов. При этом повышается точность результатов, получаемых при выполнении графических процедур. Данные усовершенствования метода также рекомендуются к практическому применению в инженерной деятельности при технологическом проектировании конвективных сушилок.

### Литература

1. Рамзин Л. К., Лурье М. Ю. Расчет сушилок и  $J - d$ -диаграмма. Способ построения  $J - d$ -диаграммы и вспомогательные таблицы для влажного воздуха. М.: Из-во ВТИ, 1930. 48 с.
2. Лурье М. Ю. Сушильное дело. М.: Госэнергоиздат, 1948. 711 с.
3. Филоненко Г. К., Лебедев П. Д. Сушильные установки. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. 264 с.
4. Лыков М. В. Сушка распылением. М.: Пищепромиздат, 1955. 203 с.
5. Теплотехнический справочник. В 2-х т. Т. 2. / под общ. ред. С. Г. Герасимова. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. 672 с.
6. Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.: Госэнергоиздат, 1963. 319 с.
7. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности / под ред. Д. Б. Гинзбурга, В. Н. Зилина. М.: Стройиздат, 1964. 495 с.
8. Левченко П. В. Расчеты печей и сушилок силикатной промышленности. М.: Высшая школа, 1968. 367 с.
9. Романков П. Г., Рашковская И. Б. Сушка во взвешенном состоянии. М.: Химия, 1968. 358 с.
10. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1968. 848 с.
11. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 429 с.

12. 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. М.: Энергия, 1973. 320 с.

14. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 750 с.

15. Машины и аппараты химических производств / И. И. Чернобыльский [и др.]. М.: Машиностроение, 1975. 456 с.

16. Теплотехнический справочник. В 2-х т. Т. 2. / под общ. ред. В. М. Юренева, П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976. 896 с.

17. Кувшинский М. Н., Соболева А. П. Курсовое проектирование по предмету «Процессы и аппараты химической промышленности». М.: Высшая школа, 1980. 223 с.

18. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1983. 552 с.

19. Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.

20. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. 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. Л.: Химия, 1991. 352 с.

23. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2-х кн. Кн. 2 / В. Г. Айнштейн [и др.]. М.: Логос, Высшая школа, 2002. 872 с.

24. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2-х ч. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 2002. 368 с.

25. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. В 2-х ч. Ч. 2 / под общ. ред. Г. М. Островского. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. 916 с.

*Поступила 19.06.2014*