

УДК 637.52 (075.8)

## Мониторинг процессов термообработки жидких продуктов на основе методов теории энтропийных потенциалов

Канд. техн. наук В. Л. ЛАЗАРЕВ, Е. Е. МИТИН

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

**A new approach to monitoring of the process of pasteurization, based on using the conception of entropy potentials, is discussed in this paper. Using of this approach allows us to predict the trend of temperature changing and warn about possibility of waste appearance.**

**Keywords:** diagnostics of modes, entropy potential, complex entropy potential, monitoring of processes, portraits of entropy potentials.

**Ключевые слова:** диагностика режимов, энтропийный потенциал, комплексный энтропийный потенциал, мониторинг процессов, портреты энтропийных потенциалов.

Значительную долю в рационе питания населения планеты составляют жидкие продукты. К примеру, по данным Росстата, за 2011 г. потребление молока и молочных продуктов на душу населения в России достигло 246 кг. При этом общий объем производства молока составил 41 450 тыс. т [1]. По санитарным нормам перед переработкой и поставкой к конечному потребителю молоко необходимо подвергнуть термической обработке, например, пастеризации [2]. Несмотря на многолетнюю практику, до сих пор не удалось полностью избавиться от брака на этом этапе производства. В процессе пастеризации можно выделить две основные причины возникновения таких ситуаций: выход температуры ниже допустимого значения и выход температуры выше допустимого значения. В первом случае возможно получить требуемые параметры термообработки продукта повторив процесс пастеризации, что приведет к дополнительным затратам энергии и времени. Во втором — возникает опасность появления белковых отложений (пригара) на стенках пастеризатора, что ухудшает питательную ценность продукта и характеристики теплообмена и, в конечном счете, может привести к выходу аппарата из строя. Такая ситуация характерна не только для молочного производства, но и для ряда других производств жидких продуктов: соков, пива и др. По оценкам экспертов, доля брака при реализации процесса пастеризации на типовом оборудовании составляет приблизительно 1%. Для предотвращения сбоев в проведении процессов термообработки необходимо повышать эффективность их превентивного мониторинга. Одним из возможных подходов для решения поставленной задачи, является метод, основанный на использовании теории энтропийных потенциалов. Его суть заключается в следующем.

Процесс пастеризации характеризуется температурой продукта на выходе. На нее влияет множество факторов (возмущений), как внешних, так и внутренних: перепады температуры исходного продукта, поступающего на обработку, перепады давления и температуры энергоносителя, кислотность, загрязненность и бактериальная обсемененность исходного продукта и др. [3]. Проявление таких возмущений обуславливает нестабильность температуры продукта во время обработки. Таким образом, можно говорить о наличии неопределенности в распределении температу-

ры во времени. Ее можно описать с помощью величины вероятностной энтропии  $H(x)$ :

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \ln p(x) dx \quad (1)$$

где  $p(x)$  — плотность распределения вероятности параметра  $x$ .

Такой подход позволяет охарактеризовать уровень неопределенности параметра с учетом вида закона распределения, но не включает в себя характеристики рассеяния и базового значения, по отношению к которому рассматривается изменение параметра. Учесть эти величины и, таким образом, увеличить качество и глубину анализа состояния неопределенности, позволяет переход к понятиям энтропийного потенциала и комплексного энтропийного потенциала, которые были введены в рамках соответствующей теории [5–7]. В классической постановке вопроса, энтропийный потенциал  $\Delta_e$  определяется как половина диапазона равномерного распределения, имеющего такую же энтропию, что и данный закон распределения  $p(x)$  [4, 5, 7]:

$$\Delta_e = \frac{1}{2} e^{H(x)} \quad (2)$$

Однако использование такого определения на практике характеризуется сложностью вычислений величины  $H(x)$ , так как требует знания закона распределения параметра в соответствии с (1). С другой стороны величина  $\Delta_e$  может быть выражена через характеристики рассеяния параметра в виде [7, 8]:

$$\Delta_e = K_e \sigma, \quad (3)$$

где  $K_e$  — энтропийный коэффициент, характеризующий дестабилизирующие свойства закона распределения параметра,  $0 \leq K_e \leq 2,07$ ;  $\sigma$  — величина среднеквадратического отклонения параметра (СКО).

Следует отметить, что на практике величина  $K_e$  не бывает меньше единицы. Поэтому для подавляющего большинства случаев имеет место

$$1 \leq K_e \leq 2,07. \quad (4)$$

Комплексный энтропийный потенциал  $L_{\Delta}$  определяется из выражения [7]:

$$L_{\Delta} = \frac{K_e \sigma}{X_n} = \frac{\Delta_e}{X_n}, \quad (5)$$

где  $X_n$  – базовое значение параметра.

В качестве величины  $X_n$  могут быть выбраны диапазон варьирования параметра, его предельное значение, математическое ожидание и др. Увеличение величины  $L_{\Delta}$  свидетельствует о возрастании состояния неопределенности параметра и наоборот.

Осуществляя анализ изменений состояний неопределенности, представляется возможным прогнозировать возникновение различных тенденций развития процесса. Такой подход, основанный на исследовании состояний неопределенности различных систем, оказался эффективным для решения разнообразных задач мониторинга и управления, в том числе и в пищевой промышленности [7, 9, 10].

В настоящее время мониторинг состояния процесса пастеризации осуществляется путем слежения за текущим значением температуры продукта на выходе с последующей фиксацией момента выхода параметра за допустимые границы. Таким образом, сведения о возникновении брака в реализации процесса получают непосредственно в момент его появления. Учитывая наличие значительного времени запаздывания и инерционности для многих промышленных объектов и пастеризационных аппаратов в частности, такой подход не дает возможности полностью избавиться от появления брака. Использование методов теории энтропийных потенциалов позволяет осуществить «превентивную диагностику» развития процесса и заранее получить информацию о наметившейся тенденции появления сбоев в работе объекта.

В предлагаемом подходе осуществляется исследование процесса в пространстве параметров энтропийных потенциалов:  $\sigma$ ,  $K_e$  и  $X_n$ . Очевидно, что это пространство можно рассматривать как частный случай фазового пространства. Анализ перемещения изображающей точки, соответствующей состоянию неопределенности параметра процесса на каждом отдельном временном интервале его реализации, позволяет выявить тенденции в его развитии и получить «превентивную информацию» о возможных последствиях.

В данной работе поставлена задача определения области пространства состояний, соответствующей нормальному температурному режиму протекания процесса и выявить возможные границы, приближение к которым чревато возникновением вышеуказанных нештатных ситуаций.

С этой целью методами пассивного эксперимента исследован типовой пастеризатор АКЛ-10 и исследованы изменения температуры продукта (молока) на выходе устройства во времени. Период для рассмотрения «эволюции» параметра был выбран равным 25 мин, что соответствует приблизительно пяти постоянным времени аппарата по каналу управления. Каждый из таких временных периодов был разбит на 40 равных интервалов, в которых и фиксировалась температура продукта. Для обеспечения идентичности условий проведения исследований, моделирование плотностей вероятностей распределения параметра производилось при помощи разбиения соответствующих отрезков времени на семь равных интервалов. В качестве базового значения использовалась величина математического ожидания. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Для проведения исследований были выбраны шесть характерных режимов протекания процесса пастеризации. Первые три режима характеризуются «нормальным» протеканием технологического процесса, в результате чего было получено надлежащее качество тепловой обработки молока. Последующие три режима имели «аномалии» по температуре готового продукта. Четвертый режим — «недогрев» характеризовался слишком низкой температурой на выходе, в результате чего продукт был направлен на повторную обработку (имел место так называемый «возврат» продукта). Пятый и шестой режимы — «перегрев» характеризовались излишним перегревом продукта со всеми вытекающими вышеуказанными последствиями.

В последних трех режимах из исходной базы данных для исследования были взяты 25-ти минутные интервалы протекания процесса, предшествующие непосредственно наступлению указанных «аномальных» ситуаций. Таким образом, была осуществлена «привязка» экспериментальных данных к возникновению этих нештатных ситуаций.

Для проведения мониторинга по каждому режиму использовались следующие величины параметров процесса:

- среднее значение температуры  $m_p$ , °C;
- минимальное значение температуры  $t_{\min}$ , °C;
- максимальное значение температуры  $t_{\max}$ , °C;
- среднеквадратическое отклонение (СКО) температуры  $\sigma$ , °C;
- энтропийный потенциал (ЭП),  $\Delta_e$ , °C;
- энтропийный коэффициент,  $K_e$ ;
- комплексный энтропийный потенциал (КЭП),  $L_e$ .

Как видно из полученных результатов значения величин энтропийных потенциалов (ЭП и КЭП, столбцы 7 и 8) для «нормальных» режимов работы аппарата  $\Delta_e$  и  $L_{\Delta}$  лежат

Таблица 1

**Результаты исследований режимов процесса пастеризации молока в пространстве параметров энтропийных потенциалов**

Параметр процесса		$m_p$ , °C	$t_{\min}$ , °C	$t_{\max}$ , °C	$\sigma$ , °C	$\Delta_e$ , °C	$K_e$	$L_{\Delta}$
Режим работы		3	4	5	6	7	8	9
Без «аномалий»	Режим 1	78,9	76,1	81,1	1,0	2,0	2,02	0,026
	Режим 2	78,0	76,6	79,6	0,8	1,6	1,93	0,020
	Режим 3	78,3	79,6	79,5	0,7	1,4	1,91	0,018
С «аномалиями»	Режим 4	85,3	83,6	86,4	0,7	1,3	1,87	0,015
	Режим 5	80,9	79,0	82,3	0,7	1,4	2,06	0,017
	Режим 6	80,4	78,2	83,4	1,2	2,2	1,86	0,028

внутри диапазонов значений, соответствующих «аномальным» значениям

$$1,3 \leq \Delta_e < 2,2, \quad (6)$$

$$0,015 \leq L_{\Delta} < 0,028, \quad (7)$$

На основании выражения (6) можно сделать вывод о том, что обнаружены приблизительные границы области состояний неопределенности, соответствующие режимам нормальной работы пастеризатора в пространстве параметров энтропийных потенциалов  $\sigma$  и  $K_e$ . Так, в соответствии с (6) эти границы будут представлены кривыми  $\Delta_1 = 1,3$  и  $\Delta_2 = 2,2$  в системе координат  $\sigma$  и  $K_e$  (рис. 1). В данном случае, вследствие ограниченности экспериментальных данных о режимах работы аппарата, они обладают некоторой степенью неопределенности, что показано «размытостью» этих границ на рис. 1. Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Условию  $\Delta = K_e \sigma = \text{const}$  соответствует кривая в системе координат  $\sigma$  и  $K_e$ . Перемещение изображающей точки по этой кривой соответствует неизменности ЭП системы, поэтому они называются линиями постоянного ЭП или изотропами. Их свойства исследованы, например, в работах [5, 7].

Вышеуказанные кривые  $\Delta_1 = 1,3$  °C и  $\Delta_2 = 2,2$  °C являются граничными изотропами. Соответствующая область «нормальных» состояний неопределенности температурных режимов на рис. 1 обозначена штриховкой.

Как свидетельствует имеющийся опыт анализа подобных ситуаций, приближение изображающей точки к нижней граничной изотропе является своего рода аналогом ситуации «затишье перед бурей». То есть, в систему поступает некое детерминирующее возмущение, которое «перекрывает» все остальные, вследствие чего снижается дестабилизирующее проявление закона распределения, что приводит к уменьшению значения величины  $K_e$  и, соответственно, к снижению величины ЭП (режимы 4 и 6). Приближение к верхней граничной изотропе связано с появлением возмущений с большой «энергетикой», характеризующихся плохой предсказуемостью значений параметров (режим 5).

Применение предложенного подхода позволяет осуществлять мониторинг температуры продукта процесса пастеризации на основании анализа состояния неопределенности и дает возможность заблаговременно принять меры по предотвращению «аномальных» режимов. Анализируя перемещения изображающей точки в пространстве параметров ЭП, можно оценивать намечающиеся тенденции изменения режимов тепловой обработки. В случае, если точка перемещается внутри области нормальных состояний (то есть  $\Delta_2 < \Delta < \Delta_1$ ), то можно говорить, что процесс не имеет «негативных» тенденций.

Приближение к указанным границам будет свидетельствовать о намечающихся тенденциях к появлению брака и наоборот. Использование выражения (7) дает возможность перейти в трехмерное пространство параметров энтропийных потенциалов ( $\sigma$ ;  $K_e$ ;  $X_n$ ) и, соответственно, получить объемную фигуру допустимой области значений, параметров КЭП добавив координату базового значения. В данном примере используется двумерная модель допустимых значений параметров, исходя из на-

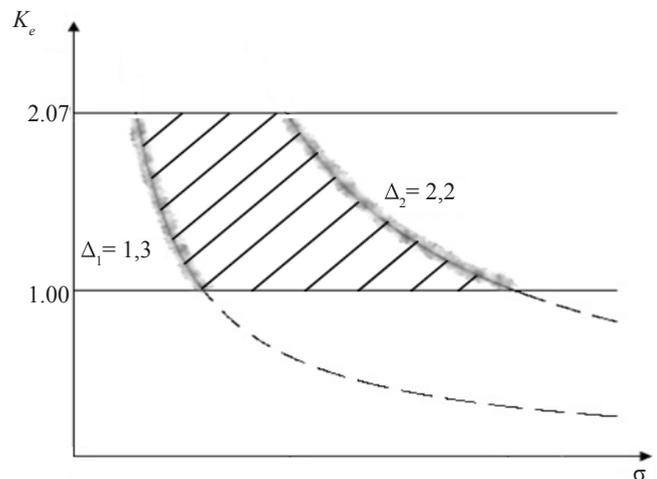


Рис. 1. Плоскость энтропийных потенциалов температурных режимов пастеризационной установки

глядности и простоты иллюстрации. Предложенная методика мониторинга процесса может быть использована также и для другого оборудования.

В дальнейшем, исходя из предложенного подхода, представляется возможным организовать внесение превентивных управляющих воздействий с целью устранения или ослабления намечающихся негативных тенденций развития процесса. Практические реализации этого вопроса рассмотрены в работах [4, 7]. Состоятельность предложенных решений подтверждается двумя патентами на изобретения.

### Список литературы

1. www.gks.ru
2. СанПиН 2.3.4.551–96 М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996.
3. Твердохлеб Г. В., Диланя З. Х., Чекулаева Л. В., Шилер Г. Г. Технология молока и молочных продуктов. — М.: Агропромиздат, 1991.
4. Лазарев В. Л. Энтропийный подход к организации мониторинга и управления. // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2005. №6.
5. Lazarev V. L. The Theory of Entropy Potentials, Basic Concepts, Results and Applications. // Pattern Recognition and Image Analysis. 2011. Vol. 21. №4.
6. Лазарев В. Л. Исследование систем на основе энтропийных и информационных характеристик. // Журнал технической физики. 2010. №2.
7. Лазарев В. Л. Теория энтропийных потенциалов. — СПб.: Изд. политех. ун-та, 2012.
8. Новицкий П. В., Левшина Е. С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. — Л.: Энергия, 1975.
9. Лазарев В. Л. Квалиметрия систем на основе энтропийных потенциалов параметров. Прикладные аспекты для пищевой промышленности и нанотехнологий // Вестник Международной академии холода. 2009. №4.
10. Лазарев В. Л., Митин Е. Е. Использование энтропийных характеристик для описания состояний неопределенности свойств пищевого сырья и продукции при организации мониторинга и управления. // V Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». 2011.