

УДК 66.048.54

## Изучение теплофизических характеристик пивного сусла

*Канд. техн. наук, доц. Радионова И.Е.*  
*канд. техн. наук, доц. Кисс В.В. vvkiss@yandex.ru*  
*Университет ИТМО*  
*Институт холода и биотехнологий*  
*921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*В настоящее время процессы концентрирования пивного сусла производятся в различных типах теплообменных аппаратов. К одним из перспективных аппаратов можно отнести роторный пленочный аппарат (РПА). В работе приведены теплофизические характеристики пивного сусла, полученные в результате экспериментальных исследований.*

*Ключевые слова:* концентрирование, пивное сусло, теплофизические свойства

---

## The analysis of the thermophysical characteristics for the concentrated beer wort

**Radionova I.E., Kiss V.V., vvkiss@yandex.ru**  
*University ITMO*  
*Institute of Refrigeration and Biotechnologies*  
*191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

*Actually different types of heat exchange equipment are used for the beer wort concentration process. One of the most perspective devices is rotary film apparatus. This item consists of the thermophysical characteristics of the beer wort, getting during the research.*

*Key words:* concentration process, beer wort, thermophysical characteristics.

---

Приготовление пивного сусла- важнейшая и наиболее сложная стадия технологии производства пива. От качества сусла во многом зависит и качество готового пива. В то же время это наиболее энергоемкий процесс, который требует больших производственных площадей. Исключение процесса варки сусла при производстве пива возможно при применении концентратов пивного сусла.

В связи с тем, что пивное сусло является термолабильным продуктом, процесс концентрирования должен проводиться при возможно более низкой температуре и минимальной продолжительности контакта продукта с теплообменной поверхностью. В настоящее время процессы концентрирования пивного сусла производятся в различных типах теплообменных аппаратов. К одним из перспективных аппаратов можно отнести роторный пленочный аппарат (РПА).

Критериальное уравнение, описывающее процессы теплообмена в исследуемом роторном пленочном аппарате имеет следующий вид:

$$Nu = f\left(\text{Pr}, \text{Re}, \text{Re}_{\text{пл}}, \text{K}_Q, \frac{\delta}{D_A}, \frac{H}{D_A}, \frac{\omega_0}{\omega_z}\right) \quad (1.1.)$$

В явном виде эта функция может быть найдена только после проведения экспериментальных исследований процессов теплообмена при концентрировании пивного сусла в РПА и их математической обработки. Кроме этого, для расчета

критериев, входящих в уравнение (1.1), необходимо определить теплофизические характеристики пивного сусла при различных значениях параметров проведения процесса.

Для этих целей была разработана экспериментальная установка, позволяющая определить необходимые характеристики и исследовать процессы теплообмена при концентрировании пивного сусла. Условия проведения эксперимента представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

Технологические режимы процесса концентрирования пивного сусла в экспериментальном роторном пленочном аппарате

| Величина                           | Обозначение      | Размерность        | Пределы изменения |
|------------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| 1                                  | 2                | 3                  | 4                 |
| Подача исходного сусла в аппарат   | $G_H$            | кг/с               | 0,8 – 2,7         |
| Температура исходного сусла        | $t_H$            | $^{\circ}\text{C}$ | 22,0 – 60,0       |
| Концентрация сухих веществ в сусле | $C_H$            | %                  | 10 - 15           |
| Давление греющего пара             | $P_{\text{изб}}$ | МПа                | 0,040 - 0,506     |
| Давление в аппарате                | $P_{\text{ост}}$ | МПа                | 0,020 - 0,065     |

Концентрирование проводилось последовательно в несколько этапов. В результате концентрирования получали сусло с концентрацией сухих веществ 65-70 %. Максимальная температура сусла на выходе из аппарата 70-80  $^{\circ}\text{C}$ , время контакта сусла с теплообменной поверхностью аппарата не более 20-30 с.

В процессе экспериментов контролировали давление греющего пара в рубашке аппарата, разрежение в системе, температуру исходного и обработанного сусла, температуру внутренней поверхности стенки аппарата в трех точках по высоте.

В результате были получены данные по теплофизическим свойствам пивного сусла, вязкости, плотности, поверхностному натяжению, коэффициентам теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости, а также зависимость этих свойств от температуры и концентрации сухих веществ сусла. В ходе экспериментов также исследовано изменение вязкости пивного сусла в зависимости от температуры и концентрации сухих веществ. Диапазон исследованных концентраций составил от 10 до 70 % сухих веществ с интервалом в 10% при изменении температуры от 20 до 70  $^{\circ}\text{C}$ .

Для определения плотности концентрированного пивного сусла был использован пикнометрический метод. Проведенные исследования позволили выявить зависимость плотности пивного сусла от содержания сухих веществ при определенных температурах, а также температурную зависимость плотности пивного сусла от содержания сухих веществ при определенных концентрациях. Данные измерений представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Зависимость плотности пивного сусла от температуры и концентрации сухих веществ

| Концентрация сухих веществ, % | Относительная плотность при температуре, °С |        |        |        |        |
|-------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|
|                               | 20  | 30     | 40     | 50     | 60     |
| 1                             | 2   | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 10                            | 1,0399                                      | 1,0394 | 1,0374 | 1,0345 | 1,0325 |
| 20                            | 1,0823                                      | 1,0782 | 1,0766 | 1,0746 | 1,0700 |
| 30                            | 1,1280                                      | 1,1262 | 1,1237 | 1,1219 | 1,1172 |
| 40                            | 1,1750                                      | 1,1730 | 1,1720 | 1,1690 | 1,1640 |
| 50                            | 1,2270                                      | 1,2260 | 1,2230 | 1,2160 | 1,2130 |
| 60                            | 1,2770                                      | 1,2750 | 1,2720 | 1,2650 | 1,2600 |

Так как концентрация сухих веществ в сусле достигала 60 %, для измерения вязкости использовали вискозиметр Гепплера.

Из анализа экспериментальных данных следует, что при малых концентрациях сухих веществ (10-30 %) происходит незначительное увеличение вязкости, т.е. между вязкостью системы и содержанием в ней дисперсной фазы должна существовать прямолинейная зависимость. Однако, при концентрациях сухих веществ 50-60% вязкость сула резко возрастает (примерно на 90 %), т.е. быстрее, чем это должно быть в соответствии с прямолинейной зависимостью. Finenger и Mark, учитывая сольватированное состояние частиц, предложили уравнение:

$$\eta_{\text{в}} = \frac{\alpha n v^n}{V - V^1} \quad (1.2)$$

где:  $\alpha$  - множитель, зависящий от формы частиц;

$n$  - общее число частиц в системе;

$V$  - объем системы мл;

$V^1$  - объем частицы вместе с энергетически и сферически связанной с ней средой.

С увеличением концентрации дисперсной фазы в растворе возрастает пропорциональная ей величина  $n$  в числителе и одновременно уменьшается величина  $(V - V^1)$  в знаменателе, что и приводит к более быстрому возрастанию вязкости, чем концентрации.

При повышении температуры от 20 до 60°C вязкость сула уменьшается. Зависимость между вязкостью и удельным объемом описывается уравнением:

$$\eta = \frac{C}{V - \omega} \quad (1.3)$$

где  $C$  и  $\omega$  индивидуальные постоянные, не зависящие ни от температуры, ни от давления. Таким образом,  $(V - \omega)$  характеризует "свободный объем" жидкости. Изменение температуры и давления вызывает изменение "свободного объема" жидкости, а это влияет на ее вязкость. Так, повышение температуры увеличивает объем жидкости, а следовательно и величину  $(V - \omega)$  и сопровождается уменьшением вязкости. Это происходит потому, что при повышении температуры увеличиваются и средние расстояния между молекулами и ослабевает взаимное притяжение между ними.

В жидкостях вязкость зависит от межмолекулярного взаимодействия.

В результате математической обработки экспериментальных данных установлено, что зависимость вязкости пивного сула от концентрации сухих веществ и температуры

описывается уравнением регрессии:

$$\ln \eta = -0.805 + 0.129CB + 0,004t - 0,001CBt \quad (1.4)$$

Определение поверхностного натяжения на границе пивного сусла и смеси его паров с воздухом проводили методом наибольшего давления пузырьков, разработанным академиком Ребиндером.

Пивное сусло - это сложная многокомпонентная система, в которой преобладают сахара, относящиеся к поверхностно-активным веществам (ПАВ). Взаимодействие между молекулами ПАВ и молекулами растворителя всегда меньше взаимодействия между молекулами чистого растворителя. Поэтому ПАВ преимущественно выталкиваются из объема раствора на поверхность. В результате накопления на поверхности раствора слоя молекул этих веществ, слабозаимодействующих друг с другом, межмолекулярное взаимодействие в поверхностном слое уменьшается и поверхностное натяжение падает.

При повышении температуры поверхностное натяжение сусла уменьшается. Это объясняется тем, что повышение температура, вызывая расширение вещества, приводит к ослаблению сил взаимного притяжения между молекулами внутри вещества и в поверхностном слое.

Эмпирическое уравнение, обобщающее результаты опытов, для определения поверхностного натяжения имеет вид:

$$\sigma = (90,31 - 0,276CB - 0,156t) \cdot 10^{-3} \quad (1.5)$$

Теплопроводность, объемную теплоемкость, температуропроводность определяли методом двух температурно-временных интервалов, который

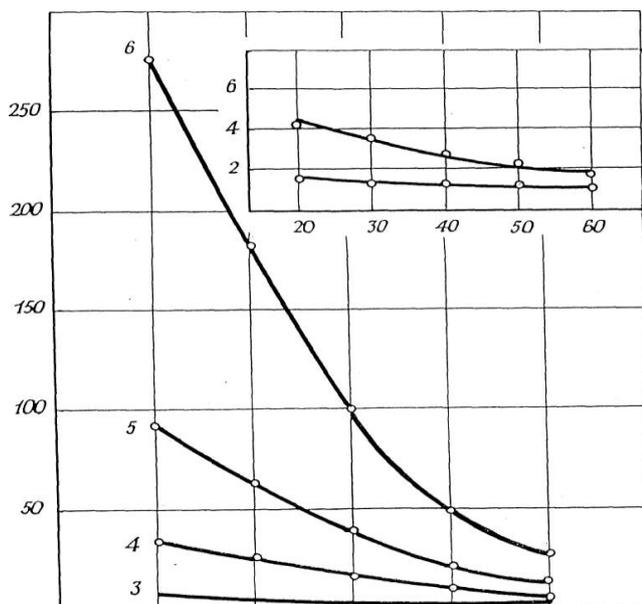


Рис. 1.1. Зависимость вязкости пивного сусла от температуры:  
1-концентрация СВ 10% ; 2-концентрация СВ 20 %.  
3-концентрация СВ 30%. ; 4-концентрация СВ 40 %.  
5-концентрация СВ 50%. ; 6-концентрация СВ 60 %.

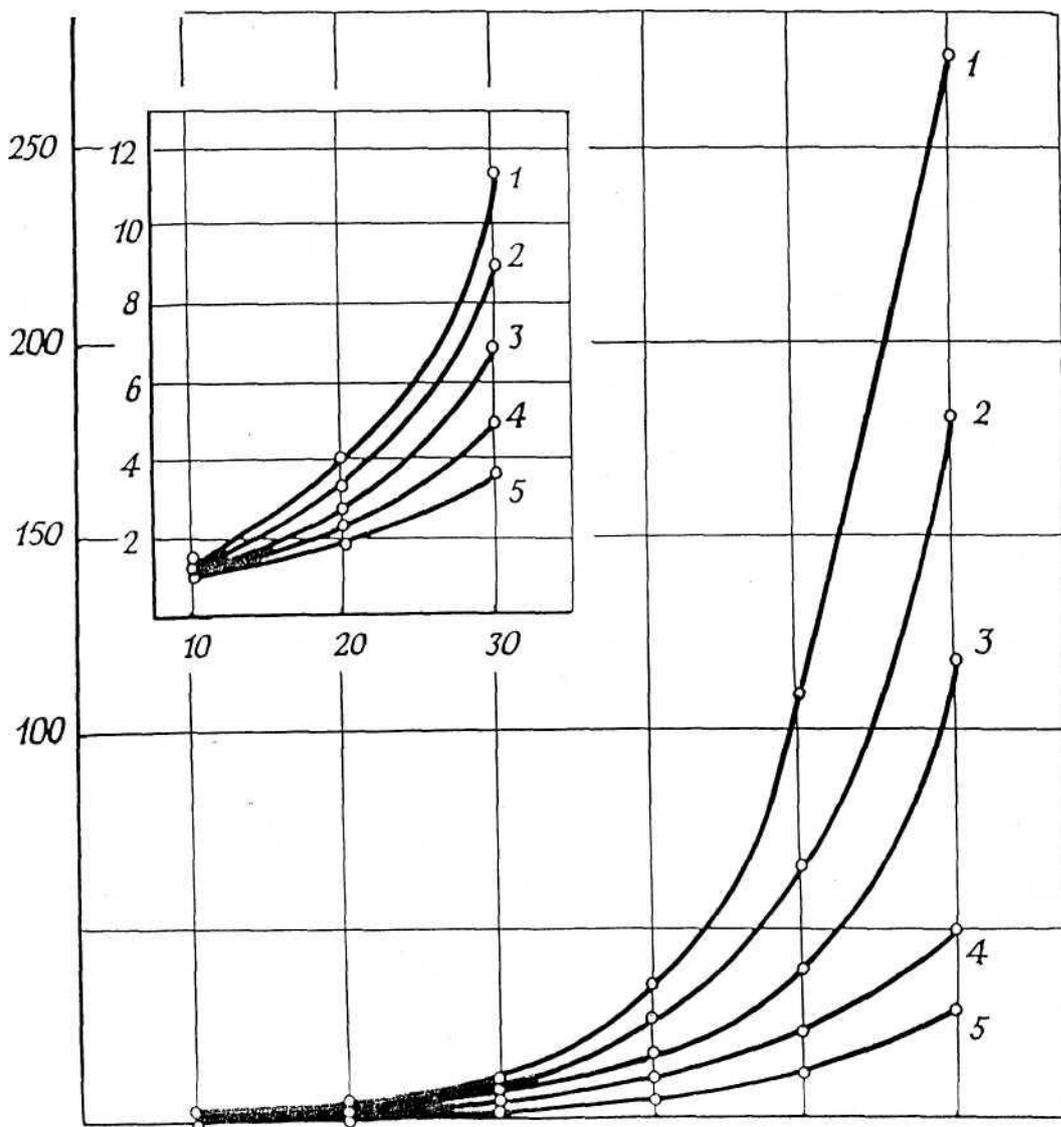


Рис. 1.2. Зависимость вязкости пивного сула от концентрации сухих веществ: 1-температура 20 °С; 2-температура 30 °С; 3-температура 40°С; 4-температура 50 °С; 5-температура 60 °С.

позволяет определять все эти теплофизические свойства одновременно. Значения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и теплоемкость пивного сусла в этом диапазоне температур и концентраций сухих веществ представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3.

| Концентрация сухих веществ, % | 10  | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура, °С               | Коэффициент температуропроводности, $10^8, \text{м}^2/\text{с}$ |       |       |       |       |       |
| 20                            | 11,0  | 10,9  | 10,8  | 10,7  | 10,6  | 10,5  |
| 30                            | 11,2  | 11,1  | 10,9  | 10,8  | 10,7  | 10,6  |
| 40                            | 11,5  | 11,3  | 11,1  | 10,9  | 10,8  | 10,7  |
| 50                            | 11,6  | 11,5  | 11,3  | 11,1  | 10,9  | 10,8  |
| 60                            | 11,7  | 11,6  | 11,4  | 11,3  | 11,1  | 11,0  |
|                               | Коэффициент теплопроводности, Вт/мК                             |       |       |       |       |       |
| 20                            | 0,492   | 0,466 | 0,424 | 0,398 | 0,370 | 0,352 |
| 30                            | 0,494   | 0,478 | 0,446 | 0,428 | 0,385 | 0,368 |
| 40                            | 0,496   | 0,486 | 0,468 | 0,440 | 0,406 | 0,382 |
| 50                            | 0,498   | 0,492 | 0,476 | 0,452 | 0,428 | 0,404 |
| 60                            | 0,500   | 0,496 | 0,482 | 0,470 | 0,439 | 0,420 |
|                               | Теплоемкость, кДж/м <sup>3</sup> 10 <sup>-3</sup>               |       |       |       |       |       |
| 20                            | 4,6   | 4,5   | 4,4   | 4,3   | 4,2   | 4,1   |
| 30                            | 4,4   | 4,3   | 4,2   | 4,1   | 3,9   | 3,8   |
| 40                            | 4,2   | 4,1   | 4,0   | 3,8   | 3,7   | 3,6   |
| 50                            | 4,0   | 3,8   | 3,7   | 3,6   | 3,5   | 3,4   |
| 60                            | 3,8   | 3,7   | 3,6   | 3,5   | 3,4   | 3,3   |

Таким образом, в результате проведенных исследований экспериментально определены значения плотности, вязкости, поверхностного натяжения, температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости пивного сусла в интервале температур 20-60°C и концентрации сухих веществ 10-60 %. Получены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать вязкость и поверхностное натяжение сусла в интервале температур проведения процесса концентрирования пивного сусла в РПА при различных концентрациях сухих веществ.

Анализ зависимостей плотности, температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости от температуры и концентрации сухих веществ показал, что их величины изменяются незначительно. В этой связи, для критериального описания процесса теплообмена с достаточной степенью точности могут быть использованы их средние значения, полученные из вышеприведенных таблиц методом интерполяции.

Полученные данные будут использованы при расчете критериев, входящих в критериальное уравнение теплообмена 1.1.

#### Литература:

1. Алтаев С.А. Ротационно-пленочный аппарат /С.А. Алтаев, К.Р. Ренн Алматы – Новости науки Казахстана. – № 1. – 1990. – С.15-16

2. Алтайулы С. Анализ эффективности теплообмена в ротационно-пленочном сушильном аппарате./С. Алтайулы// Вестник Воронеж, гос. технол. акад. 2010. - № 1. – С.29-32.

3. Василюнец И.М. Роторные пленочные аппараты в пищевой промышленности/ И.М. Василюнец, А.Г. Сабуров. – М.; Агропромиздат, 1989, 136 с.

1. Altaev S.A. Rotazionno-plenochnij apparat /S.A. Altaev, K.P. Penn Almati-Novosti nauki Kazachstana. - №1. 1990. – S. 15-16

2. Altaiuli S. Analiz ephektivnosti teploobmena v rotazionno-plenochnom suschilnom apparate./S.Alaituli// Vestnik Voronesch, gos. Technol.akadem. 2010. - №1. – S.29-32

3. Vasilinez I.M. Rotornie plenochnie apparati v pischevoi promischlennosti/ I.M. Vasilinez, A.G. Saburov. – М.; Agropromizdat, 1989, 136 s.