

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПИВА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

The article is dedicated to problem automated system by technological process of beer manufacture. The analysis of the process as control object is organized. The directions for the further study and buildings to mathematical model of technological process of production beer are considered. Article contains the description of cylindrical conic tank (CCT). Dimensions and technological parameters of the tank are defined. There is a problem to model the fermentation process of beer in the CCT using mathematical software. The basic attention is given such technological parameters as concentration diacetyl, concentration of yeast, concentration of carbonic gas, pH and temperature of beer after fermentation. To support the given parameters, it is necessary to operate a temperature mode in the CCT by the change of the flow rate of a coolant (ammonia). It is necessary, that in the cooling segment pipeline of the cylindrical conic tank there was a minimal volume of ammonia because in this case it is possible to do without smaller quantity of ammonia, to lower the subsequent evaporation and to save power resources.

**Введение.** Немаловажное значение в Республике Беларусь уделяется пищевой промышленности и тому, чтобы уровень производимой продукции был значительным. Именно достижение высокого качества пива всегда являлось актуальной задачей. Одной из важных стадий производства пива считается брожение пива в цилиндрикоконических танках (ЦКТ).

Процесс брожения в ЦКТ будет рассмотрен как объект управления, так как он по своей сути довольно сложный. Основными управляемыми величинами на выходе технологического процесса являются величины, характеризующие качество продукта (пива).

Для превращения сусла в пиво сахар, содержащийся в сусле, должен быть сброжен ферментами дрожжей [1]. ЦКТ позволяет осуществлять одновременно брожение и созревание. Пиво, полученное на выходе из ЦКТ, поступает на фильтрацию.

**Основная часть.** Важнейшим моментом в пивоварении является сбраживание дрожжами содержащегося в сусле сахара в этанол и углекислоту. Процессы, протекающие при сбраживании, можно только условно разделить на процессы главного брожения и процессы созревания, так как они переходят друг в друга. Все процессы, протекающие при брожении и созревании, необходимо рассматривать как единое целое.

Знание о метаболизме (обмене веществ) дрожжей имеет важное значение, так как этот процесс позволяет решающим образом влиять на качество пива.

Дрожжи – единственный живой организм, способный и готовый при нехватке воздуха заменить более выгодное дыхание на брожение. Как и все другие организмы, дрожжевая клетка для осуществления всех энергонезависимых процессов нуждается в энергии.

Все живые организмы получают энергию благодаря дыханию. Дыхание начинается с расщепления глюкозы. Этот процесс проходит

в цитоплазме и называется гликолиз. При этом после нескольких сложных реакций возникает пируват (пировиноградная кислота), который затем превращается в этанол (спирт) и  $\text{CO}_2$ .

Возможность сбраживать пируват имеют только дрожжи, однако при наличии кислорода брожение сильно замедляется или совсем прекращается (эффект Пастера (Pasteur)). С другой стороны, если концентрация сахара в среде превышает 0,1 г/л, то замедляется работа дыхательного ферментного комплекса и вместе с дыханием происходит брожение (эффект Крабтри (Crabtree)).

Суммарно процесс спиртового брожения выражается уравнением Гей-Люссака:



$$\Delta G = -230 \text{ кДж.}$$

Если количественно подсчитать возникающие продукты с учетом их атомных масс, то получится следующее отношение:



C: 72	48	24
H: 12	12	–
O: 96	32	64
180	92	88

Из одного моля глюкозы (180 г) при спиртовом брожении возникает 92 г спирта и 88 г  $\text{CO}_2$ . Это означает, что сахар по массе практически в равной степени разделяется на спирт и  $\text{CO}_2$ . При этом объемная доля углекислоты несравнимо больше, так как газы обладают существенно меньшей плотностью.

Во время брожения дрожжи выделяют в пиво целый ряд продуктов метаболизма, которые претерпевают количественные и качественные изменения, частично реагируя друг с другом.

Побочные продукты имеют решающее значение для качества готового пива, поэтому их образование и расщепление нужно рассматривать вместе с метаболизмом дрожжей. Вместе с

тем оценивать эти продукты следует также с позиции пивовара, который должен пытаться поддерживать их концентрацию в оптимальных пределах.

Различают следующие вещества в производстве пива (рис. 1):

– вещества, формирующие букет молодого пива (диацетил, альдегиды, сернистые соединения). Они придают пиву нечистый, зеленый, незрелый вкус и запах и при повышенной концентрации отрицательно влияют на качество пива. Эти вещества в ходе брожения и созревания могут быть удалены из пива биохимическим путем, в чем и состоит цель созревания пива;

– вещества, формирующие букет готового пива (высшие спирты, эфиры). Они в значительной мере определяют аромат пива; их наличие в определенной концентрации является предпосылкой для получения качественного пива. Эти вещества в отличие от предыдущей группы не могут быть удалены из пива технологическим путем.

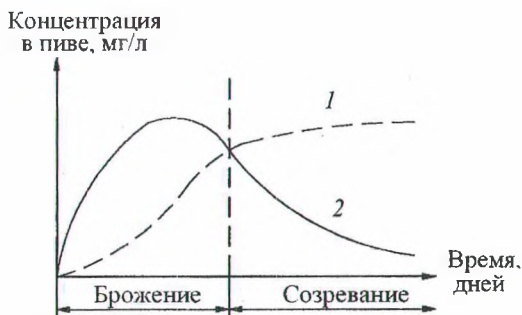


Рис. 1. Изменение концентрации побочных продуктов в ходе брожения и созревания:

- 1 – вещества, формирующие букет готового пива;  
2 – вещества, формирующие букет молодого пива

Как уже упоминалось, брожение происходит в цилиндрикоконическом танке. ЦКТ изготавливаются с верхней частью в виде цилиндра, а с нижней – в виде конуса. Такая форма дает возможность хорошо и полно отделить от пива осевшие дрожжи, а также улучшает опорожнение и мойку танка.

Габариты ЦКТ следующие:

- общая высота сусла  $H_c = 9,4$  м;
- высота конуса  $h_k = 3,6$  м;
- высота цилиндра  $h_{ц} = 5,8$  м;
- диаметр  $d = 4,2$  м;
- угол наклона конуса  $\alpha = 60^\circ$ .

Расчет объема ЦКТ (вместимости сусла) складывается из определения суммы объемов цилиндрической и конической частей танка (рис. 2):

$$V_{\tau} = V_{ц} + V_{к}, \quad (1)$$

где  $V_{ц}$  – объем цилиндрической части;  $V_{к}$  – объем конической части.

Объем цилиндрической и конической частей рассчитывается по формулам

$$V_{ц} = \frac{d^2}{4} \pi h_{ц}, \quad (2)$$

$$V_{к} = \frac{d^2}{4} \pi h_{к}. \quad (3)$$

В результате вместимость сусла будет равна

$$V_{\tau} = \frac{4,2^2}{4} \cdot 3,14 \cdot 5,8 + \frac{4,2^2}{4} \cdot 3,14 \cdot \frac{3,6}{3} = 96,9 \text{ м}^3.$$

Итого танк вмещает 96,9 м<sup>3</sup> сусла.

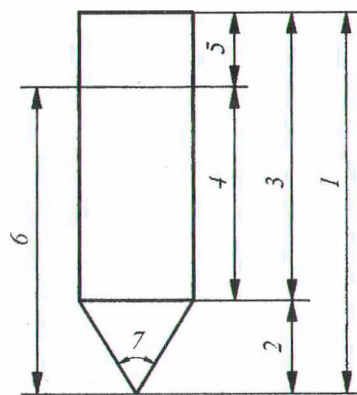


Рис. 2. ЦКТ как цилиндр и конус:  
1 – общая высота; 2 – высота конуса;  
3 – высота цилиндра; 4 – высота суслика в цилиндре; 5 – свободное пространство для пены; 6 – общая высота суслика;  
7 – внутренний угол конуса

Размеры ЦКТ зависят от мощности варочного отделения. За основу принимается, что один танк должен вмещать максимум половину произведенного в сутки сусла (и только в исключительных случаях – всю суточную выработку). Такое правило вызвано несколькими причинами:

1. Если танк вмещает больше сусла, то заполнение длится слишком долго: первая варка успевает уже забродить.

2. Если последняя варка перекачивается без внесения дрожжей, то это сусло может долго стоять в танке незабродившим, так как содержимое танка не перемешивается. Это способствует развитию инфицирующей микрофлоры.

ЦКТ заполняется для брожения не полностью, так как при брожении из-за подъема  $\text{CO}_2$  образуются завитки, занимающие значительный объем. В крайнем случае завитки поднимаются через верхушечные клапаны и могут закупоривать предохранительную арматуру. Это очень опасно, так как засохшее русло может так заблокировать арматуру, что она не сможет больше функционировать.

Поэтому за основу принято, что свободное пространство для пены ЦКТ должно составлять не менее 18–25% от объема начального сусла.



В данном случае к объему сусла  $96,9 \text{ м}^3$  необходимо добавить еще 25% свободного пространства ( $V_1$ ). Таким образом, можно узнать, сколько составляет полная высота танка ( $H_T$ ).

Если объем сусла равен  $96,9 \text{ м}^3$ , то объем для пены составляет 25% ( $V_n = 24,2 \text{ м}^3$ ).

Высота свободного пространства для пены высчитывается по формуле

$$V_n = \frac{d^2}{4} \pi h_n; \quad (4)$$

$$h_n = \frac{4 V_n}{d^2 \pi} = \frac{4 \cdot 24,2}{4,2^2 \cdot 3,14} = 1,75 \text{ м.}$$

Общая высота ЦКТ составляет

$$H = 9,4 + 1,75 = 11,15 \text{ м.}$$

Данное значение высоты танка удовлетворяет условиям технологического регламента.

Рассмотрим процесс заполнения и опорожнения ЦКТ.

ЦКТ всегда наполняется и опорожняется снизу, так как этот процесс значительно проще. Кроме того, заполнение сверху приводило бы к лишнему попаданию кислорода, что неблагоприятно сказывается на качестве пива.

Наполнение снизу означает, что ЦКТ должен соединяться с такими трубопроводами, как:

- трубопровод подачи сусла;
- линия снятия дрожжей;
- трубопровод откочки пива;
- трубопровод системы очистки танка (подача и возврат моющего раствора).

Важно, чтобы эти соединения были защищены от доступа воздуха и попадания посторонней микрофлоры.

Для переключения потоков используются специальные панели, на которых посредством перекидных калачей с помощью нескольких ручных операций производится требуемая состыковка расположенных параллельно друг над другом трубопроводов.

Соединения открываются и закрываются с помощью поворотных заслонок вручную либо дистанционно.

Чрезвычайно важно не допустить попадания кислорода, который приведет к ухудшению качества пива. Для этой цели производится продувка трубопроводов и арматуры  $\text{CO}_2$ , который полностью вытесняет воздух.

Способы и мощности системы охлаждения зависят от потребности в холоде.

При брожении выделяется тепло, которое необходимо отводить. Кроме того, для стадии холодной выдержки температура пива понижается от  $-1$  до  $-2^\circ\text{C}$ . Количество тепла, которое должно быть отведено, складывается:

– из теплоты, возникающей при брожении (энтальпия);

– теплоты, которую необходимо отнять от пива при охлаждении до температуры холодной выдержки (теплота брожения);

– теплопритоков со стороны окружающей среды, обуславливающих потери холода.

Количество тепла, возникающего при брожении, составляет  $587 \text{ кДж}$  на  $1 \text{ кг}$  экстракта.

При средней начальной экстрактивности сусла от  $11,5$  до  $12\%$  возникает  $4,3\text{--}4,6 \text{ МДж}$  теплоты/гл сусла.

Для охлаждения пива с  $+9$  до  $-1^\circ\text{C}$  необходимо около  $4200 \text{ кДж/гл}$ . Это означает то количество холода, которое требуется для отвода теплоты брожения.

Из-за излучения и конвекции тепла от окружающей среды происходят потери холода. Эти потери минимизируются с помощью современных теплоизоляционных материалов.

Общая потребность в холоде составляет в среднем  $8,6\text{--}9,0 \text{ МДж/гл}$ .

Однако эта теплота возникает неравномерно и должна отводиться также неравномерно. Время и количество отводимой теплоты зависят:

- 1) от способа брожения и созревания;
- 2) данной стадии охлаждения и скорости охлаждения.

Наибольшая потребность в холоде возникает при охлаждении пива после главного брожения в течение  $24\text{--}28 \text{ ч}$ .

Производство холода (теплоты с низкой температурой) происходит с помощью холодильно-компрессорной установки. В процессе создания холода сжатый жидкий аммиак испаряется. Для испарения ему необходима тепловая энергия. Эту теплоту аммиак отнимает у окружающей среды, которая при этом охлаждается.

Аммиак испаряется непосредственно в холодильных трубках и рубашках (охлаждение при непосредственном испарении хладагента (регулирующее воздействие на объект управления)).

Основное преимущество состоит в возможности уменьшения энергетических затрат, что ведет к снижению потребления электроэнергии.

Недостатком является повышенное давление в холодильных рубашках. Вследствие этого появляются большие инвестиционные и эксплуатационные затраты. Кроме того, температура испарения не постоянна и почти нет возможности накопления холода. Также имеется опасность утечки хладагента.

Теплопередача происходит через сегментные трубки.

В случае прямого испарения (рис. 3) аммиак подается сверху. При этом вся холодильная зона распределяется на отдельные отрезки по  $4\text{--}6$  витков. Это позволяет осуществлять равномерную теплопередачу.

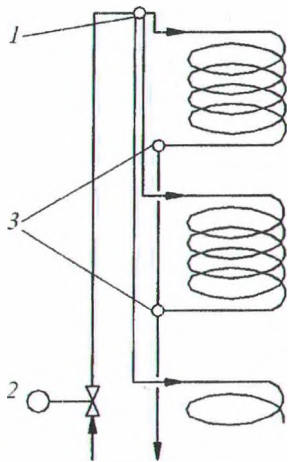


Рис. 3. Сегментные трубки с горизонтальным течением хладагента:  
1 – распределитель хладагента на зоны;  
2 – регулирующий клапан на входе;  
3 – отвод испарившегося аммиака

Следует стремиться к тому, чтобы в охлаждающем сегментном трубопроводе находился минимальный объем  $\text{NH}_3$ , так как в этом случае можно обойтись меньшим количеством аммиака, снизить последующее испарение.

Также сепаратор жидкого и газообразного аммиака может быть компактнее. Сегментные трубки вмещают  $4,5 \text{ л/м}^2$  аммиака.

Наибольшая потребность в холоде возникает после брожения и созревания при быстром охлаждении пива до низких температур. Площади поверхности теплообмена составляют:  $3,4 \text{ м}^2/100 \text{ гл}$  при температуре испарения  $+1^\circ\text{C}$  и  $1,6 \text{ м}^2/100 \text{ гл}$  при температуре испарения  $-4^\circ\text{C}$ .

Температура пива не одинакова по всему объему танка. В стадии интенсивного брожения происходит значительное перемешивание пива главным образом из-за подъема  $\text{CO}_2$ . Так как более теплое пиво поднимается вверх, то в этой стадии особенно хорошо достигается охлаждение через верхние зоны охлаждения танка. Таким образом, можно поддерживать внутри танка конвекционные потоки, когда холодное пиво опускается вниз, а теплое через центр устремляется вверх (рис. 4, а).

Независимо от температурного режима брожения и созревания температура пива снижается на стадии холодной выдержки примерно до  $0-2^\circ\text{C}$ . Пиво выдерживается при этой температуре, по меньшей мере, одну неделю с целью выделения холодной мути перед фильтрованием и розливом. При этой температуре происходит совершенно особое температурное расслоение пива, которое можно объяснить на примере воды.

Вода при  $+4^\circ\text{C}$  имеет наибольшую плотность; такова температура у дна морей и океанов. Более теплая вода, как и холодный лед, поднимается вверх. Образование льда отрицательно влияет на качество пива и затрудняет теплообмен.

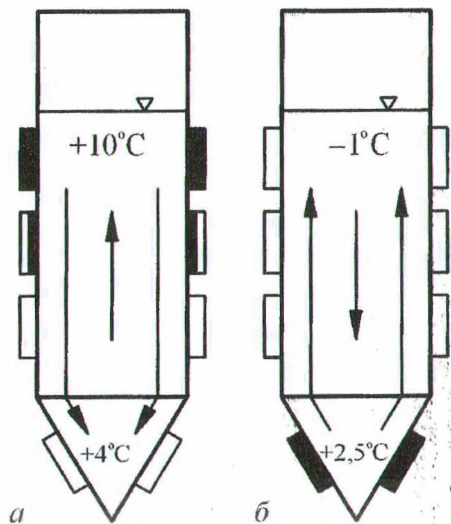


Рис. 4. Температурный режим внутри ЦКТ:  
а – конвекция внутри ЦКТ;  
б – холодная выдержка пива

Чтобы оборудование использовалось рентабельно, пиво должно сбраживаться и созревать в возможно короткие сроки. Для брожения, созревания и дображивания в настоящее время отводится не более 17–20 дней, причем существует тенденция к дальнейшему сокращению сроков брожения и созревания, по крайней мере, с сохранением достигнутого качества.

При проведении брожения и созревания в ЦКТ менее чем за три недели необходимо обращать особое внимание на некоторые технологические параметры, тем более, что визуально оценить, как идет брожение, невозможно.

Особое значение имеет азотистый состав суслу, которое зависит от режима затирания. Сусло должно содержать примерно  $23 \text{ мг}$  свободного  $\alpha$ -аминного азота/100 мл суслу, необходимого для нормального питания дрожжей. Количество свободного  $\alpha$ -аминного азота не должно быть ниже  $20 \text{ мг/100 мл}$  суслу.

Аэрация суслу и норма внесения дрожжей – решающие факторы для быстрого и интенсивного забраживания. Норма внесения дрожжей в 30 млн. клеток/мл соответствует 1 л густых дрожжей на 1 гл суслу.

Дрожжи очень чувствительны к внезапному изменению температуры. Резкое охлаждение приводит к шоку, что отрицательно влияет на брожение и размножение дрожжей. При внесении дрожжей и в логарифмической фазе роста следует избегать сильного охлаждения. Доливаемое сусло должно иметь температуру, равную бродящему пиву.

Индикатор созревания пива – расщепление диацетила. Можно исходить из того, что одновременно со значительным расщеплением диацетила исчезают и другие букетообразователи молодого пива. Незначительное расщепление диацетила происходит и при забраживании.



Общее содержание диацетила в конце фазы созревания должно быть ниже 0,1 мг/л.

Осевшие дрожжи необходимо удалять из танка, как только это позволит их консистенция. Автолиз дрожжей ухудшает качество пива.

Режим брожения и созревания пива в ЦКТ представляет собой холодное брожение с тепловым созреванием.

При холодном брожении, объединенным в одну стадию с последующим созреванием, главное брожение проводят при 8–9°C. При достижении степени сбраживания 50% охлаждение отключают и температура сама повышается до 12–13°C. После созревания и контроля расщепления диацетила пиво в танке охлаждают и выдерживают при –1°C (вариант с использованием одного ЦКТ). При избыточном давлении (1 бар) можно без карбонизации достичь концентрации CO<sub>2</sub>, равной 5,4–5,6 г/л.

В результате после снятия дрожжей пиво из танка направляют на фильтрование. Это пиво должно быть коллоидно-стойким. К пиву перед фильтрованием (выходные величины объекта управления) предъявляют следующие требования:

- температура пива – от 0 до –1°C (после недельной выдержки от –1 до –2°C);
- содержание CO<sub>2</sub> без карбонизации – по меньшей мере 0,5%;
- рН – от 4,2 до 4,4 (максимум 4,6);
- концентрация дрожжей – 2 млн. клеток/мл (максимум 5 млн. клеток/мл);
- содержание диацетила – максимум 0,1 мг/л;
- содержание кислорода – 0 мг/л.

В ходе анализа процесса производства пива как объекта управления были выявлены следующие задачи, которые необходимо решить:

1) оптимизировать температурный режим в ходе брожения (равномерное распределение холода в сусле по всему ЦКТ), снизив при этом расход аммиака на охлаждение;

2) сократить энергозатраты на процесс брожения.

Для решения данных задач предлагается разработать математическую модель процесса брожения пива в ЦКТ.

Чтобы изучить с помощью математической модели распределение холода по объему пива, можно воспользоваться формулой, которая оп-

ределяет тепловой поток  $Q$ , отвечающий за передачу тепла (холода) от хладагента через стенку теплообменника к пиву:

$$Q = \frac{t_2 - t_1}{R_t} F, \quad (5)$$

где  $t_1$  – начальная температура аммиака;  $t_2$  – температура пива, полученная в результате охлаждения;  $R_t$  – термическое сопротивление на единицу площади;  $F$  – площадь поверхности теплообменника, перпендикулярной распространению тепла [2].

В свою очередь термическое сопротивление  $R_t$  будет равно

$$R_t = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (6)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи;  $d$  – толщина стенки теплообменника;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки теплообменника.

**Заключение.** В ходе анализа процесса брожения пива были выявлены основной объект управления, а также возмущающее и управляющее воздействия.

Возмущающее воздействие на процесс брожения в ЦКТ (объект управления) связано с изменением состава, расхода и температуры подаваемого сырья (сусла) в ЦКТ.

В свою очередь управляющее воздействие на процесс брожения зависит главным образом от подачи хладагента (аммиака) в сегментные трубки для поддержания температурного режима в ЦКТ во время брожения.

Анализ процесса брожения пива в ЦКТ показал, что сам процесс является сложным и требует реализации адекватной математической модели с возможностью прогнозирования поведения параметров во времени.

## Литература

1. Кунце, В. Технология солода и пива / В. Кунце; пер. с нем. – СПб.: Профессия, 2001.
2. Протодьяконов, И. О. Динамика процессов химической технологии: учеб. пособие для вузов / И. О. Протодьяконов, О. В. Муратов, И. И. Евлампиев. – Л.: Химия, 1984.