

15.7.12.5. Технологический процесс спиртового брожения

В спиртовом производстве применяют дрожжи, относящиеся к аскомицетам (класс *Ascomycetes*). Характерной особенностью этих дрожжей является способность образовывать сумку со спорами (асками).

Общая характеристика дрожжей [30, 38]

При производстве спирта из мелассы и гидролизатов крахмала используются дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* (сахаромицеты). Сбраживание гидролизатов целлюлозосодержащего сырья и сульфитных щелоков осуществляют штаммами дрожжей, относящихся к видам *Schizocaccharomyces pombe* (шизосахаромицеты), *Saccharomyces vini* var. *cartilaginosus* и *Sacch. paradoxus* [209].

Получение вина из винограда может производиться либо с использованием чистой культуры дрожжей, либо путем спонтанного брожения [203]. Только истинно винные дрожжи рода *Saccharomyces* представляют практическую ценность для виноделия. К ним относятся дрожжи видов *Saccharomyces vini* и *Saccharomyces oviformis*.

На скорость массообменных процессов и, следовательно, на интенсивность жизнедеятельности дрожжей влияет отношение поверхности клетки дрожжей к ее объему. У дрожжей *Sacch. cerevisiae* расы XII оно равно 0,46, термотолерантных дрожжей *Sacch. cerevisiae* К-81 — 0,5–0,62, дрожжей *Schizocaccharomyces pombe* — 0,46. Дрожжи расы К-81 накапливают больше биомассы дрожжевых клеток, чем дрожжи расы XII, при различных значениях pH среды (3,2–4,2) и оптимальной температуры каждой из них.

Ведутся поиски микроорганизмов, сбраживающих на спирт не только гексозы, но и пентозы.

Помимо вышерассмотренных микроорганизмов, перспективно применение дрожжей *Pichia stipitis*. Имеются попытки замены дрожжей в процессе ферментации моносахаридов бактериальными культурами, например, *Zymomonas mobilis*. *Clostridium saccharolyticum* на угольном носителе обеспечивает превращение в этанол ксилозы (степень конверсии 62 %) и целлобиозы (на 97 %).

На спиртовых заводах, перерабатывающих мелассу, применяют дрожжи расы Я, при использовании дрожжей в качестве хлебопекарных — расу лохвицкую (Ял) и венгерскую (В). Эти расы хорошо сбраживают сахарозу, глюкозу и фруктозу и лишь 1/3 раффинозы. На некоторых заводах, сбраживающих мелассу, используют расу V-30. Она обладает высокой генеративной способностью, сбраживает раффинозу на 70–80 % и выделенные из зрелой бражки дрожжи имеют лучшие, чем дрожжи расы В, хлебопекарные качества. Мальтазная активность дрожжей этой расы более чем в 2,5 раза выше по сравнению с дрожжами расы В.

При сбраживании сусла из крахмалсодержащего сырья применяют дрожжи расы XII. Они хорошо сбраживают мальтозу, сахарозу и фруктозу, но не сбраживают конечные декстрины, гидролиз которых продолжается во время сбраживания сусла под действием декстриназы солода или глюкоамилазы микробного происхождения.

При производстве этанола из древесных гидролизатов используются адаптированные к субстратам производственные штаммы шизосахаромицетов (КС-1, ВС-1, ХорС-1 и др.) и сахаромицетов (ТС-1, АС-1, ЛобС-1 и др.).

Условия культивирования

Для нормальной жизнедеятельности дрожжей необходима температура 29–30 °С. Максимальная температура для развития дрожжей составляет 38 °С, минимальная — 5 °С; при температуре 50 °С дрожжи погибают.

Жизнеспособность дрожжей сохраняется в пределах рН среды от 2 до 8; оптимальным рН для них является 4,8–5,0. При рН ниже 4,2 дрожжи продолжают развиваться, тогда как рост молочнокислых бактерий прекращается; это свойство дрожжей используют для подавления развития бактерий в инфицированной среде, которую подкисляют до $\text{pH} = 2,8 \div 4,0$ и выдерживают определенное время.

Состав питательной среды. Дрожжи используют углерод из различных гексоз. В их отсутствие источником углерода могут служить также глицерин, маннит, этанол и другие спирты, некоторые органические кислоты. Дисахариды (мальтоза и сахароза), подвергаются предварительному гидролизу соответствующими ферментами дрожжей до моносахаридов. При переходе от анаэробных условий к аэробным способность дрожжей сбраживать глюкозу и мальтозу ослабляется, а сахарозная активность их повышается в 2,5 раза. Дрожжи потребляют мальтозу только при отсутствии в среде глюкозы и фруктозы.

Хорошими субстратами для дрожжей служат низшие жирные кислоты (уксусная, молочная, масляная и др.). Калийные соли кислот, содержащие в молекуле от 2 до 5 атомов углерода, стимулируют рост дрожжей в 1,4–3,3 раза сильнее по сравнению с соответствующими кислотами. Жирные кислоты со средней длиной углеродной цепи (от C_6 до C_{10}) потребляются дрожжами только при низкой концентрации (0,02–0,05 %); при более высокой концентрации развитие дрожжей подавляется. Жирные кислоты с 12–17 атомами углерода в молекуле усваиваются избирательно в зависимости от рода и вида дрожжей.

Содержание азота в дрожжах составляет 7–10 масс. % от массы СВ. Дрожжи способны синтезировать все аминокислоты, входящие в состав их белка, непосредственно из неорганических азотистых соединений и источников углерода. Основными источниками азота для дрожжей являются аммонийные соли неорганических и органических кислот и мочевины, которые потребляются лучше, чем азот многих аминокислот. Для потребления органического азота (аминокислот, аминов) многим дрожжам необходимы витамины (биотин, пантотеновая кислота, тиамин, пиридоксин и др.). Дрожжи не усваивают такие азотистые соединения, как белки, бетаин, холин, пурины и низшие амины (этил-, пропил-, бутиламины).

В анаэробных условиях дрожжи усваивают фосфор главным образом в начальный период брожения — 80–90 % от максимального количества в дрожжах. В сусле из

крахмалистого сырья имеется достаточное количество усваиваемых дрожжами фосфорсодержащих соединений; в меласном сусле их недостаточно, и приходится добавлять ортофосфорную кислоту.

Скорость роста дрожжей зависит от разности осмотического давления в клетке и сусле: чем она больше, тем быстрее размножаются дрожжи.

Спирт, даже в небольших концентрациях (3–4 %), тормозит почкование дрожжей. Однако в непрерывном потоке сбраживаемой среды дрожжи способны размножаться при относительно высокой концентрации спирта (7–8 об. %) и продолжать сбраживать сахара до концентрации спирта 10–12 об. %.

Свободные органические кислоты оказывают при определенной концентрации ингибирующее действие на дрожжи. Снижение выхода спирта на синтетической среде наблюдается при следующих концентрациях органических кислот, %: капроновой — 0,055; масляной — 0,045; пропионовой — 0,12; уксусной — 0,45; муравьиной — 0,09.

Сильное влияние на рост дрожжей оказывает фурфурол. Даже при незначительном его содержании снижается мальтазная и зимазная активность дрожжей.

Расход сахара на биосинтетические процессы и получение продуктов брожения. В процессе дрожжегенерирования сахар расходуется на получение трех основных продуктов: дрожжей, спирта и диоксида углерода.

При спиртовом брожении мелассы расход сахара на образование продуктов составляет, %: этанола — 46–47, диоксида углерода — 44–45,5, биомассы дрожжей — 1,8–4,0, глицерина — 3,2–4,5, высших спиртов — 0,28–0,7, альдегидов — 0,1–0,2, органических кислот — 0,2–1,0.

Потери несброженного сахара в бражке составляют 2,1–2,8 %. Выход спирта составляет 88–93 % от теоретического.

Сбраживание меласного сусла [30]

Бродящее сусло называют бражкой, или культуральной жидкостью. В процессе сбраживания происходит накопление этанола и снижение содержания сахаров, которое определяется с помощью сахарометра.

Показание сахарометра в фильтрате бражки — это *видимая плотность*, показание сахарометра в фильтрате бражки после отгонки спирта и доведения дистиллированной водой до начального объема — содержание *истинных СВ бражки*. Последнее всегда больше видимой плотности. Этими терминами заменены ранее применявшиеся — соответственно видимый и истинный отброды.

Содержание спирта в зрелой бражке (и в водно-спиртовом растворе) в объемных процентах называют крепостью бражки (и этилового спирта).

Факторы, влияющие на образование и накопление продуктов брожения.

Выделяют несколько факторов.

Интенсивность аэрирования сусла. С повышением интенсивности аэрирования сусла в дрожжегенераторах содержание спирта снижается, что связано с увеличением расхода сахара на образование биомассы дрожжей и других продуктов. Поэтому расход воздуха необходимо определять с учетом требуемого количества дрожжей в бражке. В зависимости от интенсивности аэрирования сусла при дрожжегенерировании содержание отдельных продуктов брожения в зрелой бражке (г/л) описывается следующими уравнениями:

— этанол —

$$C = 62,8 - (67,8 - 0,28\alpha)\exp[(0,013 - 0,125)\tau] - 33\alpha,$$

где α — интенсивность аэрирования среды, $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$;

τ — продолжительность брожения, ч;

— альдегиды —

$$A = \frac{0,41\sqrt{a}}{0,014(\tau - 10)^2 + 1};$$

— органические кислоты —

$$K = 0,053\sqrt{a^3} - 2,78 \cdot 10^{-7} a^4 (\tau - 10)^2;$$

— высшие спирты —

$$B = 0,22\sqrt{a} \lg(\tau - 4);$$

— сложные эфиры —

$$\Xi = 0,0085\sqrt{a} \exp(0,07\tau).$$

Концентрация сахара. При повышении концентрации сахара в меласном сусле от 9 до 14 % в зрелой бражке увеличивается содержание, г/л: альдегидов — 0,15–0,4, эфиров — 0,06–0,13 высших спиртов — 0,42–0,63, а содержание кислот снижается от 0,42 до 0,04. При понижении концентрации СВ в сусле метаболитов образуется меньше.

Кислотность сброживаемого сусла. При изменении кислотности среды от 0,3° (рН = 5,7) до 1,6° (рН = 4,2) содержание (г/л) этанола в зрелой бражке уменьшалось с 59,1 до 56,03, эфиров — с 0,15 до 0,08, концентрация альдегидов увеличивалась с 0,19 до 0,4 г/л, органических кислот — с 0,06 до 0,34 г/л, высших спиртов — с 0,47 до 0,84 г/л.

Концентрация продуктов брожения (г/л) в зрелой бражке в зависимости от кислотности среды (Н, град.: 1 градус кислотности соответствует 1 мл 0,1 н. NaOH, израсходованного на титрование 100 мл анализируемой жидкости) выражается следующими уравнениями:

— этанол —

$$C = 62,2 - (76,3 - 77H) \exp(0,028H - 0,149)\tau - 0,6H ;$$

— органические кислоты —

$$K = 0,68H - 0,0025H(\tau - 10)^2 ;$$

— высшие спирты —

$$B = 525\sqrt[3]{H} \lg(\tau - 4) ;$$

— эфиры —

$$\Xi = \frac{0,203}{\sqrt[4]{H}} \exp(0,07\tau).$$

Повышение кислотности бражки с 0,3 до 1,6° приводит к значительному увеличению общего количества метаболитов — с 12 до 24 г/л спирта.

Температура брожения. Альдегиды образуются главным образом в начальный период брожения, затем их содержание уменьшается, и в зрелой бражке альдегидов тем меньше, чем выше температура брожения. Например, при температуре 24 °С альдегидов было 0,27 г/л, при температуре 36 °С — 0,18 г/л.

Содержание продуктов брожения (г/л) в зрелой бражке в зависимости от температуры сбраживания (T) описывается следующими уравнениями:

— этанол —

$$C = 64 - (4,25T - 35) \exp[(0,13 - 0,01T)\tau] - 0,12T ;$$

— альдегиды —

$$A = \frac{2,8}{[0,028(\tau - 10)^2 + 1]^5 \sqrt{T}} ;$$

— органические кислоты —

$$K = \frac{13,5 \cdot 10^3}{T^3} - \frac{1,15}{T^2} (\tau - 10)^2 ;$$

— высших спиртов —

$$B = 0,28 \lg(\tau - 4) - 0,0056T ;$$

— эфиры —

$$\Xi = 0,00069T \exp(0,85\tau).$$

Раса дрожжей. Мелассное сусло сбраживают различными расами дрожжей, чаще — одновременно двумя. Состав продуктов сбраживания приведен в табл. 15.7.175. Основное количество побочных метаболитов накапливается главным образом при дрожжегенерировании.

Таблица 15.7.175

Содержание сахара, биомассы и продуктов брожения (%) в зрелой бражке [30]

Компоненты	Дрожжевые гибриды						
	В	112	67	93	105	71	202
Несброженный сахар	100	93	107	76	98	72	95
Биомасса дрожжей	100	122	100	101	129	84	115
Глицерин	100	108	—	112	110	112	100
Этанол	100	97	100	101	97	101	100
Альдегиды	100	83	130	430	120	430	390
Высшие спирты	100	90	104	89	90	93	113
Сложные эфиры	100	82	88	136	110	130	113
Органические кислоты	100	300	155	250	210	220	170
Летучие азотистые вещества ¹⁾	100	30	35	25	15	30	20
Непредельные соединения ²⁾	100	106	95	88	95	86	84

Способы сбраживания. На спиртовых заводах, перерабатывающих мелассу, применяют одно- и двухпоточный способы сбраживания сусла. Для заводов, выпускающих спирт и хлебопекарные дрожжи, рекомендуется однопоточный способ, дающий дрожжи с более высокой при хранении стойкостью.

При *однопоточном* способе сбраживания готовят сусло одной концентрации (22–24 %), вследствие чего упрощаются технология и управление процессом брожения.

Мелассное сусло сначала используют для культивирования дрожжей, а затем непрерывно сбраживают ими. Стерилизованная меласса смешивается с кислотами, питательными веществами, антисептиком, разбавляется до 40 % СВ и освобождается от взвешенных примесей на осадочных центрифугах. Осветленный раствор разбавляется водой до концентрации 22–24 %. Полученное мелассное сусло поступает в дрожжегенераторы, куда подается также чистая культура дрожжей, размноженная на стерилизованном мелассном сусле.

В дрожжегенераторах дрожжи выращивают при температуре 28–30 °С и постоянных аэрации и притоке сусла. Видимое содержание СВ в производственных дрожжах должно составлять 16–17 %, содержание спирта — 2,5–3,0 об. %, количество дрожжевых клеток — 100–120 млн клеток/мл, кислотность — 0,4–0,7°.

Производственные дрожжи при помощи специальных воронок непрерывно отводят через наклонный коллектор в головной аппарат бродильной батареи, состоящей из 9–11 аппаратов. Бродящее сусло по переточным трубам последовательно проходит все бродильные аппараты, и зрелая бражка через механические фильтры подается на сепарацию в цех хлебопекарных дрожжей. Обездрожженную бражку подают в ректификационное отделение.

Газы брожения из бродильных аппаратов после освобождения от спирта в спиртоловушках направляют в цех по получению жидкого диоксида углерода.

При двухпродуктовом производстве спирта предложен усовершенствованный процесс сбраживания мелассы, сущность которого заключается в понижении концентрации дрожжевого мелассного сусла до 16–17 % СВ и рециркуляции 20 % зрелых производственных дрожжей в головной дрожжегенератор с анаэробным сбраживанием в бродильной батарее и подачей неразбавленной мелассы (20–25 % от общего количества) на стадии главного брожения.

Особенностью бродильной установки является последовательное соединение дрожжегенераторов с вводом в них 75–80 % количества мелассы в виде сусла концентрацией 16–17 % СВ. Производственные дрожжи выращивают при дифференцированном аэрировании. Зрелые производственные дрожжи из последнего дрожжегенератора направляют в головной бродильный аппарат. Неразбавленную мелассу непрерывно подают в два головных бродильных аппарата, в которых поддерживают концентрацию СВ бражки 20 и 22 %.

При таком способе сбраживания мелассы можно уменьшить содержание в зрелой бражке побочных продуктов (глицерина на 15, альдегидов на 47, летучих кислот на 37 %) и потери с несброженными сахарами (на 15 %), что позволяет увеличить выход спирта на 0,2 %.

Сущность *двухпоточного способа* непрерывного сбраживания мелассного сусла заключается в том, что в нем предусмотрено сепарирование дрожжей и возвращение их в начало бродильной батареи для многократного использования, в результате чего снижаются затраты сахара на синтез новой биомассы и повышается выход спирта приблизительно до 2 %. Многократное использование возвращаемых дрожжей ведет к сокращению и устранению лаг-фазы, даже логарифмической фазы, и приводит к повышению интенсивности брожения.

В связи с тем, что систематический возврат отсепарированных дрожжей в головные аппараты бродильной батареи сопровождается инфицированием продуктов брожения, получил распространение бессепарационный способ.

Особенностью аппаратурно-технологической схемы установки для сбраживания сусла с рециркуляцией дрожжей является наличие узлов концентрирования, обработки дрожжевой суспензии антисептиком и возврата ее в головной бродильный аппарат. Для рециркуляции дрожжей, выделенных из бражки через 5–12 ч от начала брожения, из 5-го или 6-го бродильного аппарата бражку насосом подают в сепаратор. Концентрированную дрожжевую суспензию направляют в сборник для ее антисептирования сульфолом и ортофосфорной кислотой в количествах соответственно 0,025–0,05 и 0,5 об. % при выдержке до 0,5 ч. Из сборника дрожжевая суспензия поступает в головной бродильный аппарат. Обездрожженную бражку из сепаратора отводят в бродильный аппарат, следующий за тем, из которого отбирали бражку.

Меласса в лопастном смесителе смешивается с серной или соляной кислотой, а также ортофосфорной кислотой или диаммонийфосфатом и антисептиками. Для предотвращения

разложения сахара концентрированной кислотой мелассу разбавляют двух- или трехкратным объемом воды.

Асептированная меласса поступает в смеситель для приготовления дрожжевого сусла. Меласса, предназначенная для основного сусла, поступает в смеситель без добавления кислот и питательных солей; в нее вносят только раствор антисептика.

Дрожжевое сусло из смесителя непрерывным потоком поступает в дрожжегенераторы, куда вводят и чистую культуру дрожжей. Производственные дрожжи из каждого дрожжегенератора непрерывно отводят в головной аппарат бродильной батареи, состоящей из 10 аппаратов.

В головной аппарат непрерывным потоком направляют основное сусло в отношении 1 : 1 к количеству производственных дрожжей. Подачу основного сусла и производственных дрожжей регулируют так, чтобы видимое содержание СВ в бражке головного бродильного аппарата было 10–12 %, а содержание спирта 5–6 об. %. Бражка по переточным трубам проходит бродильную батарею и насосом подается в передаточный аппарат, а из него на перегонку. Газы брожения направляют в спиртоловушки, и освобожденный от спирта диоксид углерода, удаляемый из бродильных аппаратов, поступает в цех жидкого диоксида углерода, а из дрожжегенераторов — в атмосферу.

По обычному двухпоточному способу в дрожжегенераторы с мелассой вводится 27 % сахара, остальные 73 % его направляют в головной бродильный аппарат. Подачу сахара (мелассы) в батарею заканчивают на 6–7-м часу процесса брожения, включая и время дрожжегенерирования.

По усовершенствованному двухпоточному способу в дрожжегенераторы с мелассой вводят только 18–18,5 % сахара (выращивание на 8% сусле) и 81,5–82 % его равными частями (концентрация сусла 43–45 %) направляют в 1-, 2- и 3-й бродильные аппараты. В этом случае подачу сахара с мелассой в бродильную батарею заканчивают на 11–12-м часу брожения, включая и время дрожжегенерирования, и дображивание ведут периодически. Это снижает концентрацию СВ в дрожжегенераторах с 5,5–6 до 2,4–2,8 %, а на стадии главного брожения с 13,5–15 до 8,5–9,0 %.

При работе по усовершенствованному способу бродящее сусло в дрожжегенераторах содержит значительно меньше (2,8 %), чем по обычному двухпоточному способу (3,8 %), спирта. В зрелой бражке на 15–20 % меньше несброженного сахара, и ниже содержание кислот (на 17 %), альдегидов (на 21 %) и глицерина (на 20–30 %). При этом выход спирта на 0,5 % выше, брожение протекает интенсивнее и заканчивается примерно на 2 ч раньше.

Сравнительная характеристика способов сбраживания. Технологические показатели основного сусла и бражки приведены в табл. 15.7.176.

Таблица 15.7.176

Характеристика различных способов брожения [30]

Показатель	Способ	Подработанная	Основное	Сбраживаемая среда в	Зрелая
------------	--------	---------------	----------	----------------------	--------

	брожения	меласса	сусло	бродильных аппаратах					бражка
				№ 1	№ 3	№ 5	№ 7	№ 9	
Концентрация СВ, %	1	—	—	13–15	10–11	8,5	6,5	5	5
	2	75–80	30–45	9–13	8	6	5,2		
Кислотность, град	1	—	—			0,45			
	2	Нейтральная или щелочная	Нейтральная или щелочная	0,4	0,4	5,1	0,5	0,5	0,5
рН	1	—	—						
	2	6,8–7,2	6,8–8,0	5,2	5,2	5,1	5,1	5,1	5,1
Концентрация спирта, об. %	1	—	—						
	2	—	—	5,5	7,8	8,5	8,8	8,9	8,9
Температура, °С	1	—	—	30	31	30	29	28	28

Двухпоточный способ имеет определенные преимущества перед однопоточным. При двухпоточном способе сахар сбраживается полнее, образуется меньше побочных продуктов, вследствие чего выход спирта из 1 т условного крахмала на 1,0–1,5 дал выше.

Потери крахмала при сбраживании мелассы по однопоточному способу составляют 181,5 кг, по двухпоточному — 158,1 кг/1 т перерабатываемого условного крахмала.

Особенности сбраживания при получении хлебопекарных дрожжей. При сбраживании, направленном на повышение выхода и свойств хлебопекарных дрожжей, увеличивают нормы минерального и органического питания, исходя из содержания азота и фосфора в дрожжах и мелассе. Лучшим источником азотного питания считают карбамид, который дрожжи усваивают без образования кислотного остатка и изменения рН среды. На 1 т перерабатываемой мелассы вносят 1,5–2,0 кг карбамида и 1,8–2,0 кг 70% ортофосфорной кислоты.

Рекомендуется следующий технологический режим дрожжегенерирования и брожения: концентрация СВ в сусле 20–22 %, рН = 5,1÷5,2; титруемая кислотность 0,5–0,6°, содержание спирта в производственных дрожжах 2,5–3,5 об. %, в зрелой бражке — 8,0–8,5 об. %; температура в дрожжегенераторах 28–29 °С, в бродильных аппаратах 29–30 °С; расход воздуха на аэрирование в дрожжегенераторах 4,5–5,0 м³/(м³ · ч); количество биомассы в сусле 15–20 г/л, в зрелой бражке — 30–35 г/л.

Сбраживание двумя расами дрожжей. Различные дрожжевые гибриды при сбраживании сусла проявляют разные свойства. Например, гибрид 112 накапливает биомассу с высокой мальтазной активностью, гибрид 75 сбраживает раффинозу. Но оба этих гибрида дают меньший выход спирта, чем раса дрожжей В. Использование смеси дрожжей основной расы В и гибридов не дает положительных результатов, т. к. при совместном их выращивании через определенное время начинает преобладать какая-то одна раса. Поэтому для повышения степени использования углеводов и повышения выхода спирта предложен двухступенчатый способ сбраживания мелассного сусла двумя

культурами дрожжей, выращенных отдельно в аппаратах чистой культуры. Лучшие результаты сбраживания сахаров, в том числе раффинозы, и повышения мальтазной активности дрожжей получены при использовании 80–85 % основной культуры (раса В) на первой стадии и 15–20 % дополнительной культуры (Г-75), подсеваемой на второй стадии по истечении половины времени брожения.

Для получения наряду со спиртом большего количества хлебопекарных дрожжей сусло сбраживают на первой стадии гибридными дрожжами Г-112, во второй — дрожжами расы В. Результаты сбраживания сусла одноступенчатым и двухступенчатыми способами приведены в табл. 15.7.177.

Качество хлебопекарных дрожжей при двухступенчатом сбраживании значительно выше, чем при одноступенчатом способе производства (табл. 15.7.178).

Таблица 15.7.177

Характеристика зрелой бражки при различных способах сбраживания [30]

Показатель зрелой бражки	Обычный способ	Двухступенчатый способ
Видимая концентрация СВ, %	6,9	6,8
Истинная концентрация СВ, %	9,9	9,3
Кислотность, град.	0,44	0,43
Крепость бражки, об. %	8	7,6
Содержание несброженного сахара, г/100 мл	0,375	0,351
Содержание биомассы дрожжей, г/л	22,6	26,9
Количество дрожжевых клеток:		
общее, млн/мл	174	224
почкующихся, %	21	18
мертвых, %	2,4	1,1
Выход прессованных дрожжей, кг/дал спирта	2,8	3,5

Таблица 15.7.178

Характеристика хлебопекарных дрожжей [30]

Показатели дрожжей	Обычный способ	Двухступенчатый способ
Влажность, %	72,9	73
Кислотность, мг уксусной кислоты/100 г дрожжей	102	90
Подъемная сила, мин	51	42
Мальтазная активность, мин	70	85

Зимазная активность, мин	22	25
Стойкость при 35 °С, ч	43,5	46

Сбраживание зерно-картофельного сусла [30]

Все сусло кроме той части, что идет на приготовление дрожжей, направляется в бродильные аппараты, и содержащийся в нем сахар сбраживается дрожжами в спирт. При сбраживании зерно-картофельного сусла одновременно происходит доосахаривание декстринов.

На отечественных спиртовых заводах в настоящее время применяют в основном непрерывно-проточный, проточно-рециркуляционный и циклический, а на малых заводах еще периодический способы сбраживания сусла.

Сущность *непрерывно-проточного* способа заключается в непрерывном притоке осахаренного сусла и вводе дрожжей в головной аппарат бродильной батареи, состоящей из нескольких последовательно соединенных между собой сосудов, в непрерывном сбраживании этого сусла и оттоке зрелой бражки из последнего, концевой аппарата. Концентрация дрожжей в батарее поддерживается на определенном уровне скоростью притока сусла, а отток идет по принципу сообщающихся сосудов.

Особенностью непрерывно-проточного способа является неравномерность перемещения сусла в батарее бродильных аппаратов. За один оборот головного аппарата, т. е. за одну смену объема сусла, в нем остается около 36 % первоначального (старого) сусла и такое же количество введенного нового сусла выносится из аппарата. Это приводит к усилению развития посторонних микроорганизмов, главным образом молочнокислых бактерий. С увеличением числа оборотов количество задерживаемого старого сусла уменьшается. Влияние неравномерности перемещения сусла в батарее и его неоднородности на результаты брожения очень велико, т. к. полное освобождение первого бродильного аппарата от остатков старого сусла происходит через 6–7 оборотов (один оборот — 6–7 ч), а 6-й аппарат батареи полностью освобождается от старого сусла только через 14 оборотов.

Периодическое сбраживание имеет то преимущество, что оно ограничено во времени и от начала до конца проводится в одном аппарате, который по завершении цикла стерилизуют паром. Поэтому при проточном сбраживании необходимо проводить профилактическую стерилизацию аппаратов, которая осуществляется строго последовательно, по номерам аппаратов — от головного к концевому через определенные промежутки времени и независимо от состояния, степени и стадии брожения.

В зависимости от всхожести солодового зерна, степени инфицирования солода, физиологического состояния перерабатываемого сырья и чистоты дрожжей период между последовательной стерилизацией аппаратов батареи может колебаться от 1,5 до 10 сут. (обычно 3 сут.).

При непрерывно-проточном способе сбраживания в головном аппарате устанавливается нормативная численность дрожжевых клеток (90–12 млн/мл).

При *проточно-рециркуляционном* способе из аппаратов 1–4 образуется рециркуляционный контур, в котором можно создать нужную скорость разбавления ($1,5D-2D \text{ ч}^{-1}$) и этим воздействовать на повышение удельной скорости роста микроорганизмов при стабилизации этих показателей в остальной части (5–10 аппаратах) батареи. Объем рециркулируемой сбраживаемой среды составляет 100 % от исходного притока сусла в батарею, что позволяет включить дополнительный приток этого сусла в количестве 40 об. % от основного. В результате рециркуляции снижается унос дрожжей, обеспечивается их повторное использование, что сопровождается повышением выхода спирта.

Циклический способ, по которому работает большое число предприятий, представляет собой разновидность полунепрерывных методов брожения, в которых взбраживание и главное брожение протекают непрерывно, а дображивание — периодически. Для осуществления способа необходимы 2–3 механизированных дрожжевых аппарата, один взбраживатель и 2–3 батареи из 6–7 бродильных аппаратов, соединенных между собой переточными трубами.

Работа батареи по циклическому способу начинается с периодического или полунепрерывного размножения дрожжей в двух дрожжевых аппаратах и дальнейшего их накопления до 25–30 % от вместимости головного бродильного аппарата во взбраживателе. Размножение дрожжей в дрожжевых аппаратах и во взбраживателе продолжается по 14–16 ч. Кислотность сусла ($0,9-1,2^\circ$ в дрожжевых аппаратах и $0,5-0,7^\circ$ во взбраживателе) устанавливается добавлением раствора серной кислоты (редко — в результате молочнокислого брожения).

В дрожжевых аппаратах дрожжи размножаются (40–40 мин) на дополнительно осахаренном, пастеризованном ($75-78^\circ\text{C}$, 20–30 мин), охлажденном сусле; во взбраживатель сусло поступает из общей магистрали без пастеризации, но подкисленное.

В начале работы батареи головной аппарат наполняют одновременно дрожжами и суслом; из него бродящее сусло непрерывно и последовательно заполняет следующие бродильные аппараты примерно за 25–30 ч, после чего приток сусла прекращают и переводят на другую параллельную батарею, а в этой батарее проводят периодическое дображивание сусла при температуре не выше 30°C в течение 32–38 ч. По окончании дображивания батарею освобождают от бражки, начиная с концевой аппарата по направлению к головному. Новый цикл брожения в первой батарее (пока во второй идет дображивание) начинают с 7-го аппарата; свободные аппараты предварительно стерилизуют и охлаждают. Сусло, загруженное в батарею в обратном направлении, оставляют снова на дображивание, а приток свежего сусла переводят в концевой аппарат второй батареи и т. д.

Недостатком циклического способа является неодинаковая продолжительность пребывания бражки в отдельных аппаратах, что ведет к инфицированию бражки и снижению выхода спирта. Для предупреждения инфицирования целесообразно иметь две параллельные линии подготовки полупродуктов (дробилки солода, баки солодового

молока, осахариватель, теплообменник), и при стерилизации одной из них непрерывность притока сусла в батарею не нарушается.

При *периодическом* способе брожения все операции проводят в одном аппарате. Приготовленное в осахаривателе сусло охлаждают до 30 °С, добавляют засевные дрожжи и выкачивают сусло в каждый бродильный аппарат. При непрерывном способе осахаривания зрелые дрожжи сливают непосредственно в бродильный аппарат.

Начальная температура сусла («складка») зависит от продолжительности брожения: чем больше продолжительность, тем ниже температура (18–20 °С при 72 ч, 24–25 °С при 48 ч). Во время главного брожения поддерживается температура 29–30 °С, в процессе дображивания — 27–28 °С.

При осахаривании разваренного замеса крахмалистого сырья ферментами сусло охлаждают («складывают») при температуре 26–27 °С с целью интенсификации гидролиза во время брожения.

Брожение считают законченным, когда содержание несброженных сахаров (РВ) в бражке достигнет 0,2–0,3 г/100 мл, а видимое и истинное содержание СВ не изменится в течение последних 2–3 ч.

Во время брожения бродильные аппараты соединяют со спиртоволушкой для конденсации спиртовых паров, уносимых диоксидом углерода.

Если из-за остановки брагоректификационного аппарата необходимо затормозить брожение, то бражку охлаждают в конце главного брожения до 15–20 °С. При длительном простое зрелую бражку асептируют формалином (40 мл 40% формалина/10 дал бражки).

Зрелую бражку из бродильного аппарата прямо или через передаточный резервуар перекачивают в брагоректификационный цех.

Таблица 15.7.179

Характеристика различных способов брожения [30]

Характеристика	Проточно-рециркуляционный	Непрерывно-проточный	Циклический	Периодический
Продолжительность брожения, ч	51	56	66	72
Выход спирта, дал/т крахмала	65,6	65,4	64,9	64,7
Съем спирта, дал/(м ³ · сут.)	4,1	3,0	2,3	2,0
Видимая плотность бражки, %	–0,2	–0,1	0,20	0,35
Истинные СВ бражки, %	3,1	3,3	3,4	3,6
Несброженные РВ, г/100 мл	0,17	0,23	0,35	0,45
Нерастворенный крахмал	0,05	0,08	0,10	0,12
Титруемая кислотность, град	0,40	0,40	0,53	0,40

pH	4,5	4,5	4,3	4,5
Крепость бражки, об. %	8,5	8,4	8,2	8,0

Основные технологические показатели брожения и состав зрелой бражки при различных способах приведены в табл. 15.7.179.

Освобожденный от бражки аппарат моют горячей водой; внутреннюю поверхность аппаратов затем обрызгивают раствором хлорной извести и выдерживают 20 мин, после чего смывают ее водой. После герметизации аппараты пропаривают паром до 100 °С с выдержкой не менее 30 мин (расход пара около 12 кг/м³).

Сбраживание виноградного сусла [203]

Брожение виноградного сусла проводят при температуре 14–22 °С.

При периодическом способе к суслу добавляется 1–3 % ЧК. В течение 1–2 сут. идет процесс забраживания. Бурное брожение наступает на 3–4-е сутки с повышением температуры и интенсивным выделением углекислоты. Продолжительность бурного брожения — 5–8 сут. Тихое брожение наступает с момента накопления 7–8 об. % спирта и продолжается от 3 до 12 суток.

Формирование вина начинается вслед за окончанием бурного брожения и заканчивается к моменту первой переливки — снятия виноматериала с дрожжей. Оптимальная температура формирования — 12 °С.

В период формирования происходят следующие процессы: оседание дрожжей (от 1 до 5 недель), выделение углекислоты, выделение солей винной кислоты — с образованием спирта падает растворимость битартрата калия, ионы калия и кальция реагируют с винной кислотой, образуя кристаллы солей. Одновременно происходит автолиз дрожжей, в результате чего вино обогащается витаминами, ферментами, аминокислотами, минеральными солями. Также в этот период наблюдается яблочно-молочнокислое брожение — под действием молочнокислых бактерий яблочная кислота превращается в менее кислую на вкус молочную.

Брожение считается законченным, когда плотность сусла падает ниже 0,995 и остается не более 0,2–0,3 г/100 мл сахаров. После окончания брожения в течение 1–2 мес. проводится осветление молодых виноматериалов. Когда вино станет прозрачным, делают первую открытую переливку.

Коньячные виноматериалы (сырье для коньячного спирта) получают сбраживанием сусла из розовых и белых сортов. Виноград перерабатывают по схеме приготовления белых сухих виноматериалов без применения сернистой кислоты (см. разд. 15.7.11). Сусло перед отстаиванием охлаждают до 10–12 °С. В коньячных виноматериалах допускается содержание дрожжей до 2 %.

Сбраживание гидролизатов целлюлозосодержащего сырья [38]

При сбраживании гидролизатов, вследствие антисептических свойств отдельных примесных компонентов, нет необходимости постоянного введения ЧК. Поэтому технология производства спирта предусматривает циркуляцию рабочей расы дрожжей.

В спиртовом производстве отечественных предприятий гидролизно-спиртового профиля применяют непрерывно действующие ферментаторы. Объем ферментатора составляет, м³:

$$V = \frac{(G_c + G_d)t}{zK},$$

где G_c и G_d — соответственно расход поступающего на брожение сусла и дрожжевой суспензии, м³/ч; t — продолжительность брожения, ч; z — число ферментаторов в батарее; K — коэффициент заполнения аппарата (0,8–0,85).

Для сбраживания гидролизатов используется ферментатор цилиндрической формы, в нижнем конусе которого медленно перемещается мешалка со скребками, обеспечивающая удаление осадка мертвых и малоактивных дрожжей. Суспензия отработанных дрожжей подается в сборник, из которого направляется на использование, например, в нейтрализаторы для обогащения гидролизата биогенными веществами. Вывод дрожжей из системы компенсируется размножением части дрожжей (15–20 %).

Подготовленное сусло с концентрацией РВ 3,2–3,5 % (рН = 4,0÷4,5) направляется в дрожжанку, где смешивается с отсепарированной дрожжевой суспензией (в соотношении 10 : 1 по объему). В дрожжанке происходит взбраживание — активация при контакте со свежим субстратом. Из дрожжанки смесь сусла и дрожжей подается в головной ферментатор спиртового брожения, где происходит главное брожение, при котором образуется 80–90 % этанола. В последовательно соединенном хвостовом ферментаторе происходит стадия дображивания (отброд), при котором усваивается в основном труднображиваемая галактоза. Обычно на 2–3 головных ферментатора приходится один дображивающий.

Спиртовая бражка из хвостового ферментатора направляется на сепараторы для отделения дрожжевой суспензии, которая полностью возвращается в дрожжанку.

Спиртовое брожение проводится в анаэробных условиях при 32–34 °С в течение 5–7 ч и концентрации дрожжей в культуральной жидкости 20–30 г/л (в пересчете на дрожжи 75% влажности). Бродильная способность дрожжей выражается в килограммах РВ, сбраживаемых 1 кг дрожжей в час (сутки), и составляет 0,2–0,3 кг/(кг · ч).

В результате брожения образуется промежуточный продукт производства — спиртовая бражка, содержащая 1,0–1,5 % этанола. Концентрация несброженных гексоз не должна превышать 0,1 %. Выход этанола составляет 56–59 л из 100 кг сбраживаемых РВ.