

УДК 663.52

Синтез теплоты дрожжевыми клетками при сбраживании пивного сусла

канд. техн. наук Баланов П.Е. balanov@yandex.ru

канд. биол. наук Иванченко О.Б.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Во многих производственных и технологических процессах, где используются дрожжи *S.cerevisiae*, например, в пивоварении, процессы синтеза тепловой энергии дрожжами является одной из важных проблем. В статье приводятся расчеты количества тепловой энергии синтезируемой дрожжевыми клетками при сбраживании пивного сусла.*

Ключевые слова: дрожжевые клетки, пивное сусло, тепловая энергия

Heat energy synthesis by yeast cells while beer wort fermentation

Ph.D. Balanov P.E., *Ph.D.* Ivanchenko O.B.

Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.

Institute of Refrigeration and Biotechnology

191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*Whenever *S.cerevisiae* yeast is used in production and technological processes, for instance, in beer, the process synthesis heat energy remains one of the most important problems. This article is devoted to calculation of heat energy volume synthesized by yeast cells while beer wort fermentation.*

Key words: yeast cells, beer wort, heat energy

В процессе жизнедеятельности некоторые микроорганизмы выделяют тепловую или световую энергию. Выделять в окружающую среду то или иное количество тепла способны почти все микроорганизмы. Тепло выделяется в результате неполного использования микроорганизмами энергии окисления органических веществ, полученной в результате дыхания. Дыхание (или биологическое окисление)

микроорганизмов представляет собой совокупность биохимических процессов, в результате которых освобождается энергия, необходимая для жизнедеятельности микробных клеток. Все физиологические процессы, такие как движение, рост и размножение, образование спор и капсул, выработка токсинов, могут осуществляться при постоянном притоке энергии. Микроорганизмы добывают энергию за счет окисления химических соединений: углеводов (чаще глюкозы), спиртов, органических кислот, жиров и др.

Путем калориметрического анализа установлено, что в большинстве случаев из всего количества энергии, выделившейся из субстрата в ходе дыхательных процессов, на нужды самих микроорганизмов используется примерно лишь четвертая часть. Значительная доля энергии (75—90%) в виде тепла выделяется в окружающее пространство. Выделением тепла при дыхании микроорганизмов обуславливаются процессы самосогревания влажного сена и хлопка, навоза, торфа, зерновых масс, муки.

При этом создаются условия для развития термофильных микроорганизмов, развивающихся при повышенных температурах [1]. К числу таких микроорганизмов относятся термогенные бактерии (от греч. *therma* - тепло и *genesis* - рождение). В процессе своей жизнедеятельности они выделяют большое количество тепла и нагревают окружающую их среду до +70-80°C. Они размножаются в богатых органическими веществами торфе, навозе, сене, причем наиболее интенсивный рост их популяции происходит при 50°C и выше и иногда вызывают «самовозгорание» органических веществ. К термогенным бактериям относится, например, *Thermos aquaticum* [2].

Наиболее изученным и часто встречаемым явлением является самосогревание зерна.

Изучением природы самосогревания зерновой массы и условий, влияющих на возникновение и ход этого процесса, занимались многие исследователи, как в нашей стране, так и за рубежом. Самосогревание возникает в результате активной жизнедеятельности зерна. Под самосогреванием понимают повышение температуры зерновой массы вследствие протекающих в ней физиологических процессов. Вместе с тем, самосогревание возникает только в тех случаях, когда за зерновыми массами отсутствует надлежащий контроль и уход. Самосогревание может произойти в каждой партии зерна любой культуры. Однако в партиях зерна, имеющих влажность в пределах критической, при соблюдении определенных режимов хранения самосогревания можно легко избежать. Ведущая роль в самосогревании (наряду с существенной ролью самого зерна в процессах теплообразования) принадлежит микроорганизмам. Выделение микроорганизмами в зерновую массу большого количества тепла объясняется тем, что микробов много, что все они обладают способностью переработать по отношению к их массе большое количество питательных веществ, используя при этом на свои нужды незначительную часть освобождаемой энергии (плесневые грибы 5—10%), остальная же энергия в виде тепла выделяется в межзерновое пространство.

Нужно иметь в виду, что в связи с плохой теплопроводностью зерна быстрое и необходимое снижение температуры в партиях греющегося зерна может быть достигнуто только активной (принудительной) обработкой его воздухом, что достигается пропуском зерновой массы через зерноочистительные машины или цепочку транспортеров, применением стационарных и передвижных установок для активного вентилирования. Пассивное охлаждение греющейся зерновой массы результатов не дает. Даже сильные морозы не останавливают процесса самосогревания внутри насыпи [3].

Существует довольно много светящихся бактерий, у которых окислительные процессы в клетке сопровождаются отдачей не тепловой, а световой энергии. Свечение морской воды, прелого дерева, пищевых продуктов (мяса, рыбы) обуславливается присутствием светящихся бактерий, или фотобактерий. Их свечение объясняется интенсивным окислением кислородом особых фотогенных веществ. Установлено, что светиться могут и убитые бактерии [4].

Выделение тепла при дыхании микроорганизмов можно наблюдать при выращивании культур в сосудах, защищенных от потери тепла, где температура питательной среды постепенно повышается.

Процессы выделения тепла в окружающую среду известны не только в мире микроорганизмов, но и широко распространены среди высших организмов, и особенно они актуальны при хранении овощей и фруктов. Что касается выделения тепла различными овощами, фруктами и ягодами во время хранения - чем выше температура хранения, тем больше выделяется тепла. Для снижения интенсивности дыхания понижают температуру.

Большинство овощей и фруктов хорошо хранят при температуре, близкой к 0 °С, но одновременно исследования показали, что даже при этой низкой температуре дыхание лишь замедляется, но не прекращается. И при этом все равно выделяется тепло. Поэтому, если оно не удаляется, то также происходит саморазогревание, т. е. постепенное повышение температуры, которое, в свою очередь, интенсифицирует дыхание. При этом энергии выделяется еще больше. Для борьбы с этим явлением при хранении овощей и фруктов используют приемы хранения продукции в атмосфере газовой смеси. Наиболее распространенная искусственная газовая смесь, состоящая из 2-3 % O₂, 3-5 % CO₂ и 93 % N₂ при относительной влажности 90-95 %, позволяет длительно хранить почти все овощи и фрукты. Эти параметры немного изменяются в зависимости от вида продукции.

В конце 20 века ученые приступили к точному измерению обмена веществ у животных и человека, выяснилось, что организм многих млекопитающих выделяет в виде тепла больше энергии, чем теоретически должно выделяться при расщеплении компонентов пищи. Некоторых это даже заставило сомневаться в применимости закона сохранения энергии к живым существам. Сотрудник Монгольского государственного медицинского института Жамбалын Шагж показал, что "лишняя" энергия вырабатывается симбиотическими бактериями, обитающими в толстом кишечнике

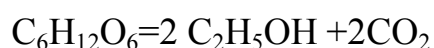
человека и многих животных. Оказалось, что эти микроорганизмы, разлагающие неперевариваемые вещества- целлюлозу растительной пищи и соединительнотканые элементы мяса - превращают их в усвояемые вещества, например, жирные кислоты. Эти-то соединения и служат "неучтенным" топливом для организма хозяина, кроме того, и при жизнедеятельности самих бактерий выделяется тепло. Поэтому толстый кишечник в дополнение к другим своим функциям является "печкой" организма. Так, организм человека получает из жирных кислот, выработанных бактериями в его толстом кишечнике до 540 килокалорий в сутки [5].

Таким образом, все биотехнологические процессы и производства, использующие в технологии микроорганизмы и, в частности, клетки дрожжей сталкиваются с проблемами тепловыделения и теплоотведения.

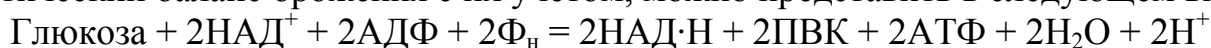
При спиртовом брожении в сусле протекают биологические, биохимические, физико-химические процессы. Питательные вещества, поступающие в дрожжевые клетки из сусла, под действием ферментов превращаются в различные промежуточные продукты, расходуемые на спиртовое брожение и рост дрожжей.

Основным биохимическим процессом брожения является превращение сбраживаемых сахаров в этиловый спирт и диоксид углерода. Большая часть экстракта сусла состоит из углеводов, из них около 75% сбраживаются (сбраживаемые сахара). Часть экстракта составляют несбраживаемые вещества. К ним относятся декстрины, белки, минеральные вещества и др.

Сахара сбраживаются в определенной последовательности, что обусловлено скоростью их проникновения в дрожжевую клетку. В первую очередь сбраживается фруктоза и глюкоза. Сахароза предварительно гидролизует ферментом β -фруктофуранозидазой дрожжей до глюкозы и фруктозы, которые также расходуются в первую очередь. После фруктозы и глюкозы дрожжи поглощают мальтозу, которая под действием фермента α - глюкозидазы превращается в легкосбраживаемую глюкозу. Мальтотриоза расходуется дрожжами медленно и не полностью. Таким образом, для процесса брожения стартовым компонентом всегда будет являться глюкоза. В общем виде процесс преобразования глюкозы в основные продукты брожения можно представить в следующем виде:



Эта реакция сопровождается выделением энергии, которая может расходоваться, на нужды клетки, а также выделяться в виде тепла. Та энергия, которую аккумулирует клетка, содержится в специальных молекулах АТФ (аденозинтрифосфат) и энергетический баланс брожения с их учётом, можно представить в следующем виде:



Где НАД – кофермент (Никотинамидадениндинуклеотид)

НАД·Н – восстановленная форма кофермента

АДФ – аденозиндифосфат

ПВК – пировиноградная кислота

Превращения пировиноградной кислоты, в различные метаболиты (у разных микроорганизмов различные) на накопление АТФ уже не влияют. Таким образом, при брожении, получается 2 молекулы АТФ энергоёмкость которых составляет 61 кДж/моль ($30,5 \times 2$).

Проведем термодинамические расчёты. Общая разность энергии исходных продуктов и продуктов спиртового брожения составляет 230 кДж/моль.

$2870 \text{ кДж/моль (энергия глюкозы)} - 2640 \text{ кДж/моль (энергия этанола)} = 230 \text{ кДж/моль}$.

Замеры делались с помощью сжигания веществ в калориметрической бомбе [6]. Несколько отличающиеся данные этих термодинамических расчётов мы можем видеть у отечественных авторов, а именно 210 кДж/моль [7,8]

Разница этих энергий (энтальпий образования) составляет: $230 \text{ кДж/моль} - 61 \text{ кДж/моль} = 169 \text{ кДж/моль}$. Это и есть, то количество теплоты, которое выделится в результате брожения дрожжевых клеток.

Применительно к пивоварению эта величина указывает сколько тепловой энергии высвободится при брожении сусла в нормальных условиях, т.е. без учёта теплопритоков из окружающей среды и теплоты, собственно, охлаждаемой жидкости (в данном случае – сусла).

Для энергетических расчётов в условиях пивоварения эти данные могут использоваться с учётом следующих технологических показателей:

- Масса сусла идущего на брожение;
- Объём сусла идущего на брожение;
- Экстрактивность сусла идущего на брожение;
- Относительная плотность сбраживаемого сусла;
- Степень сбраживания сусла;
- Молекулярная масса глюкозы $M=180 \text{ г/моль}$

В одном килограмме глюкозы содержится $1000\text{г}/180\text{г/моль}=5,5 \text{ моль}$. При её ферментации выделится $5,5\text{моль} \times 169\text{кДж/моль}=929,5\text{кДж}$ тепловой энергии выделится при брожении 1кг глюкозы (экстракта), эта величина будет отправной точкой для создания формулы по расчёту тепловыделения дрожжей.

Учитывая характеристики продукта мы получаем:

$$Q=(929,5 \times m \times \text{ССд} \times \text{Э})/10000 \quad (1)$$

где Q - тепловыделение при брожении определённого сорта пива

m – масса сбраживаемого экстракта, кг

ССд – действительная степень сбраживания, %

Э – экстрактивность сусла, %

10000 – коэффициент нивелирующий относительную (процентную) величину

Такой величиной, как масса пользоваться в условиях пивоваренного производства не практично, кроме того, она будет регулярно варьироваться в зависимости от экстрактивности сусла. Поэтому целесообразно перейти к объёмным величинам:

$$m = \rho \times V \quad (2)$$

где m – масса сбраживаемого сусла, кг

ρ – абсолютная плотность начального сусла, кг/ м³

V – объём сбраживаемого сусла, м³

Абсолютная плотность в пивоварении применяется редко, вместо неё традиционно пользуются относительной плотностью сусла ($d^{20/20}$), которую получают отношением массы известного объёма сусла к массе равного объёма воды при 20°C. Эта величина табличная и зависящая от экстрактивности сусла. Обычно она находится в пределах 1,04-1,05.

Чтобы получить абсолютную плотность, относительную плотность раствора умножают на абсолютную плотность воды при интересующей температуре (20°C), в нашем случае эта величина = 998,23 кг/ м³.

Таким образом переход к абсолютной плотности сусла будет выглядеть следующим образом:

$$\rho = d^{20/20} \times 998,23 \quad (3)$$

где ρ – абсолютная плотность начального сусла, кг/ м³

$d^{20/20}$ – относительная плотность сусла определяемая по таблице

Объединяя формулы (1) (2) и (3) мы получаем следующее соотношение:

$$Q = (929,5 \times d^{20/20} \times 998,23 \times V \times \text{ССд} \times \text{Э}) / 10000 \quad (4)$$

где Q - тепловыделение при брожении определённого сорта пива, кДж

929,5 – тепловыделение от сбраживания 1 кг экстракта, кДж

$d^{20/20}$ – относительная плотность сусла, определяемая по таблице

998,23 – абсолютная плотность воды при 20°C, кг/ м³

V – объём сбраживаемого сусла, м³

ССд – действительная степень сбраживания, %

Э – экстрактивность сусла, %

10000 – коэффициент нивелирующий относительную (процентную) величину

Если множители выраженные числами привести к единому знаменателю, то мы получим следующую итоговую формулу:

$$Q = 92,78 \times d^{20/20} \times V \times \text{ССд} \times \text{Э} \quad (5)$$

где Q - тепловыделение при брожении определённого сорта пива, кДж

92,78 – коэффициент пересчёта

$d^{20/20}$ – относительная плотность сусла, определяемая по таблице

V – объём сбраживаемого сусла, м³

CCd – действительная степень сбраживания, %

\mathcal{E} – экстрактивность сусла, %

Список литературы:

1. Славянский А.К., Шарков В.И., Ливеровский А.А. Химическая технология древесины. [Электронный ресурс] http://www.ximicat.com/ebook.php?file=slavyansky_teh
2. Быков Б.А. Экологический словарь. — Алма-Ата: «Наука». 1983.[Электронный ресурс] <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ecolog/>
3. Микробы, их величества, поджигают за счет количества [Текст] / Борис Сергеев // Чудеса и приключения. - 2004. - N 4. - С.6-7.
4. Кунце В. Технология солода и пива.- СПб.: Профессия.- 2009.-113бс.
5. Шапошников В. Н.Техническая микробиология, М.: Советская наука.- 1948.
6. Кретович В.Л. Основы биохимии растений, 4 изд., М.: Изд-во Высшая школа.-1964.-350с.