

Исследование реологических характеристик и определение рациональных параметров процесса сушки активированной закваски для хлебобулочных изделий

Дмитрий М. Бородулин	¹	borodulin_dmitri@list.ru
Елена А. Сафонова	¹	safonova.kem@yandex.ru
Екатерина В. Невская	²	katerinarose@mail.ru
Маргарита Т. Шулбаева	¹	sh-m-t@yandex.ru
Денис В. Дonya	¹	doniadv@rambler.ru
Татьяна И. Непомнящая	¹	matmodeli@yandex.ru

¹ Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), 6-й Строителей, 47, г. Кемерово, 650056 Россия

² Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, ул. Б. Черкизовская, 26А, г. Москва, 107553, Россия

Реферат. Работа направлена на исследование реологических свойств закваски в процессе созревания и хранения с последующим определением рациональных параметров ее сушки в различных сушильных установках с анализом микрофлоры высушенных образцов. Изучены реологические свойства закваски с использованием штамма молочнокислых бактерий (МКБ) *L. acidophilus* 146А (активатора) и без него, которые показали, что закваска для производства хлебобулочных изделий специализированного назначения относится к неньютоновским или аномально-вязким жидкостям, описываемым реологическим уравнением Оствальда-де-Вале. Выявлено, что внесение штамма МКБ *L. acidophilus* 146А способствует уменьшению вязкости в процессе созревания почти в 3 раза, а при хранении образцов – в 2 раза, о чем свидетельствует значение коэффициента консистенции. Активатор снижает влияние температуры, поэтому структура закваски становится более стабильной. В таком состоянии она легче подвергается дальнейшей переработке. Следовательно, добавление штамма МКБ *L. acidophilus* 146А в закваску для производства хлебобулочных изделий специализированного назначения значительно снижает энергозатраты на весь процесс производства и приводит к увеличению срока годности. Выявлены кинетические закономерности сушки активированной закваски в терморadiационной, конвективной и сублимационной сушилках при их различных температурных режимах работы. Определены рациональные параметры сушки закваски для производства хлебобулочных изделий специализированного назначения. Выполнен анализ полезной микрофлоры высушенных образцов. Выявлено, что наименьшему разрушающему воздействию подвергаются микроорганизмы при конвективной и сублимационной (лиофильной) сушки. Микробный титр в этих образцах составляет не менее $1 \cdot 10^5$ КОЕ/г, в то время как при сушке терморadiационным методом титр полезной микрофлоры ниже в десять раз по отношению к ним. Учитывая, что температура проведения процесса не является разрушающей для заквасочных микроорганизмов – вероятнее всего пониженная выживаемость микрофлоры связана именно с радиационной активностью инфракрасных ламп. В результате проведенных исследований выявлено, что оптимальным видом сушки для активированной закваски является конвективная.

Ключевые слова: штаммы, закваска, реология, терморadiационная сушка, конвективная сушка, сублимационная сушка, кинетика сушки, хлебобулочные изделия

Research of rheological characteristics and determination of rational parameters of drying process of activated ferment for bakery products

Dmitrii M. Borodulin	¹	borodulin_dmitri@list.ru
Elena A. Safonova	¹	safonova.kem@yandex.ru
Ekaterina V. Nevskaya	²	katerinarose@mail.ru
Margarita T. Shulbaeva	¹	sh-m-t@yandex.ru
Denis V. Donya	¹	doniadv@rambler.ru
Tatyana I. Nepomnyashchaya	¹	matmodeli@yandex.ru

¹ Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia

² Scientific Research Institute of the Bakery Industry, B. Cherkizovskaya str., 26A, Moscow, 107553, Russia

Summary. The work is aimed at investigating the rheological properties of the ferment in the process of maturation and storage with subsequent determination of the rational parameters of its drying in various drying plants with the analysing of microflora of dried samples. We studied the rheological properties of the ferment using the strain of the lactobacilli *L. Acidophilus* 146A (activator) and without it, which showed that the ferment for the production of special purpose bakery products to non-Newtonian or anomalously viscous liquids described by the Ostwald-de-Vale rheological equation. We found that the introduction the strain of the lactobacilli *L. Acidophilus* 146A helps to reduce the viscosity during maturation by almost 3 times, and when storing the samples – in 2 times, this is indicated by the value of the consistency coefficient. The activator reduces the influence of temperature, so the structure of the ferment becomes more stable. It is easier to further process in this state. Consequently, the energy consumption for production is significantly reduced and the increases expiration date after the strain of the lactobacilli *L. Acidophilus* 146A is added to the starter for the production of special purpose bakery products. We detected kinetic patterns of drying of the activated ferment in thermoradiation, convective and sublimation dryers under different temperature operating conditions. We have determined the rational parameters of drying the ferment for the production of bakery products of specialized purpose. We analyzed the useful microflora of the dried samples. It has been revealed that microorganisms undergoing convective and sublimation (freeze drying) are subjected to the smallest destructive effect.

Для цитирования

Бородулин Д.М., Сафонова Е.А., Невская Е.В., Шулбаева М.Т., Дonya Д.В., Непомнящая Т.И. Исследование реологических характеристик и определение рациональных параметров процесса сушки активированной закваски для хлебобулочных изделий // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 4. С. 40–48. doi:10.20914/2310-1202-2017-4-40-48

For citation

Borodulin D.M., Safonova E.A., Nevskaya E.V., Shulbaeva M.T., Donya D.V., Nepomnyashchaya T.I. Research of rheological characteristics and determination of rational parameters of drying process of activated ferment for bakery products. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 4. pp. 40–48. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-4-40-48

We found that microorganisms are less destroyed by convective and freeze drying. The microbial titer in these samples is at least $1 \cdot 10^5$ CFU/g. While drying by the method of infrared irradiation, this titer is lower by a factor of ten compared to other types of drying considered. Taking into account that the temperature of the process is not destructive for starter microorganisms, it is most likely that the reduced survival of the microflora is due precisely to the radiation activity of the infrared lamps. As a result of the conducted studies it was revealed that the optimal type of drying for the ferment is convective.)

Keywords: strain, ferment, rheology, thermoradiation drying, convection drying, freeze drying, kinetics of drying, bakery products

Введение

Применение новых видов сырья, расширение ассортимента и разработка хлебобулочных изделий специализированного назначения, распространение нарезки и упаковки хлеба обуславливают актуальность проблемы его микробиологической порчи. Возбудителями болезней хлеба являются не только плесневые грибы, вызывающие заплесневение хлеба, но и ряд других биологически активных микроорганизмов, приводящих к потерям качества продукции.

Увеличение сроков годности и предотвращение микробиологической порчи [1–3] хлебобулочных изделий возможно за счет использования биологических методов. Они предусматривают применение заквасок, которые в процессе тестоприготовления образуют органические кислоты, бактериоцины и другие ингибиторы возбудителей ингибиторы роста возбудителей микробиологической порчи хлеба. Кроме того, хлеб, приготовленный на заквасках, характеризуется улучшенными: структурой пористости и свойствами мякиша, вкусом и ароматом, способностью к длительному сохранению свежести. Поэтому для разработки технологии специализированных хлебобулочных изделий [4, 5] необходимо подобрать наиболее эффективный штамм молочнокислых бактерий, обладающий антагонистической активностью по отношению к возбудителям порчи хлеба, синтезирующий биологически активные вещества, аминокислоты, витамины, за счет которых можно повысить пищевую и биологическую ценность изделий.

Для удобного использования, хранения и транспортировки актуальным является создание сухих биопрепаратов заквасок с сохранением всех биотехнологических показателей молочнокислых бактерий и дрожжевых клеток.

При рассмотрении характеристики и свойств ацидофильной закваски, аспектов ее использования в хлебопекарной промышленности выявлено, что ацидофильная закваска представляет большой интерес, так как она имеет в своем составе пробиотические микроорганизмы, формирующие структуру теста, как из пшеничной, так и ржаной муки.

Целью настоящей работы являлось изучение физических свойств закваски за счет исследования ее реологических показателей на этапе активации и хранения, а также определение

оптимального вида сушки данных образцов реологических показателей [8] и микрофлоры закваски на этапе ее активации, хранения, и высушивания.

Достижение поставленной цели осуществлялось путем решения следующих задач:

1. исследование антагонистической активности хлебопекарных промышленно ценных штаммов молочнокислых бактерий;
2. изучение кривых течения закваски без использования активатора в процессах ее созревания и хранения;
3. изучение кривых течения закваски с использованием активатора в процессах ее созревания и хранения;
4. изучение кинетики сушки в терморadiационной, конвективной и сублимационной сушилке с последующим определением рациональных параметров сушки активированной закваски;
5. определение количества полезной микрофлоры в образцах высушенной закваски.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлась ацидофильная закваска для приготовления хлебобулочных изделий специализированного назначения.

Предметом исследования было изучение физических и реологических свойств закваски и определение рациональных параметров видов сушки, удовлетворяющего заданным требованиям.

Исследования антагонистической активности [7] хлебопекарных промышленно ценных штаммов молочнокислых бактерий (МКБ) были проведены в институте ФГАНУ «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности». В качестве тест-культур использовали плесневые грибы *P. Roqueforti* и *P. funiculosum*, спорообразующие бактерии *Bacillus subtilis* 40, дрожжеподобные грибы ВМБХ (в настоящее время идентифицируются). Для контроля роста тест-культур использовали стерильное солодовое сусло. Модельная среда представляла собой предварительно прогретую культуру МКБ. В пробирки с модельной средой, охлажденной до 30 °С, добавляли инокулят тест-штамма плесневого гриба или ВМБХ. Культивирование плесневых грибов в модельной среде проводили при температуре 24 °С в течение 10 сут., появление и рост видимого мицелия грибов оценивали визуально. Выращивание ВМБХ проводили при температуре 24 °С

в течение суток; влияние метаболитов МКБ на рост ВМБХ оценивали подсчетом в камере Горяева количества клеток тест-штамма. Воздействие метаболитов МКБ на рост спорообразующих бактерий *Bacillus subtilis* 40 осуществляли по диффузионному методу лунок на среде КМАФАнМ. В лунки вносили модельную среду на основе чистых культур МКБ; чашки помещали в термостат с температурой 30 °C на сутки. Наличие антагонистической активности МКБ определяли по диаметру зоны ингибирования роста тест-штамма вокруг лунки.

Для определения реологических характеристик продуктов при сдвиговом течении использовалась измерительная установка – ротационный вискозиметр «RHEOTEST-2» с измерительной системой S/S1, представленная на рисунке 1.

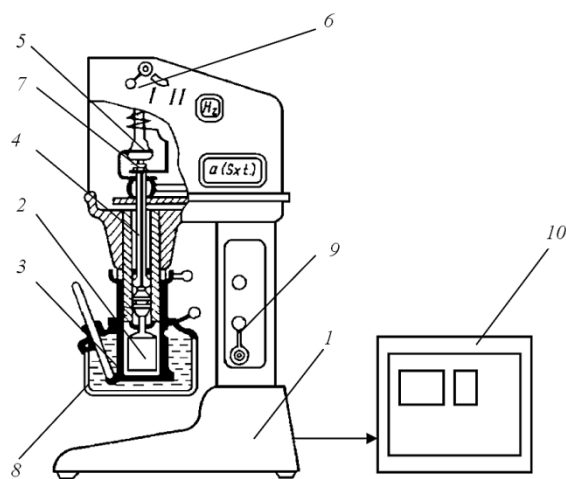


Рисунок 1. Функциональная схема измерительной установки: 1 – станина; 2 – измерительный цилиндр (внутренний); 3 – измерительная емкость (наружный цилиндр); 4 – измерительный вал; 5 – приводной вал; 6 – динамометр (спиральная пружина); 7 – потенциометр; 8 – термостатирующая емкость; 9 – рычаг переключения коробки передач; 10 – индикаторный прибор

Figure 1. Functional scheme of the measuring device: 1 – frame; 2 – measuring cylinder (internal); 3 – measuring capacity (outer cylinder); 4 – a measuring shaft; 5 – a power shaft; 6 – dynamometer (spiral spring); 7 – potentiometer; 8 – thermostatic capacity; 9 – the lever of a gear change; 10 – indicator device

Измерительный механизм экспериментальной установки представляет собой механико-электрический преобразователь вращающего момента. Для измерения момента вращения, действующего на вращающемся измерительном цилиндре 2, используется вращение измерительного вала 4 относительно приводного вала 5 в направлении, обратном действию двухступенчатого динамометра 6. Приборный потенциометр 7, связанный с динамометром и включенный в мостовую

схему, воспроизводит величину относительного вращения. При этом естественный сигнал «вращающий момент» преобразуется в пропорциональный ему аналоговый сигнал тока, который регистрируется индикаторным прибором 10.

Методика проведения эксперимента при определении реологических характеристик предусматривает следующие операции:

1. установка измерительного (внутреннего) цилиндра 2 на приводном валу 5;

2. заливка заданного объема исследуемого продукта в измерительную емкость (наружный цилиндр) и его установка в рабочее положение коаксиально цилиндру 2. При этом происходит заполнение исследуемой массой кольцевого зазора;

3. приведение во вращение измерительного (внутреннего) цилиндра 2 при помощи рычага переключения коробки передач 9. Вращение на данной скорости проводят до стабилизации показаний вторичного прибора, измеряющего угол α относительного поворота цилиндров 2 и 3;

3. регистрация частоты выходного сигнала датчика силы и определение по расчетным соотношениям установившегося значения напряжения сдвига τ при фиксированной скорости сдвига γ и температуре;

4. увеличение скорости сдвига γ в слое исследуемого продукта на $\Delta\gamma$;

5. выполнение заданного числа k раз пунктов 4–6 настоящей методики;

6. определение реологических характеристик исследуемого продукта с помощью разработанной компьютерной программы «Виртуальная модель кривых течения» (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Виртуальная модель кривых течения» № 2008612695, зарегистрирована 29.05. 2008 г.).

Для изучения кинетики сушки закваски в терморadiационной, конвективной и сублимационной сушилках [8–12] строились кривые сушки.

После каждой сушки образцы закваски подвергались определению в них количества клеток полезной микрофлоры. Для этого были проведены посевы методом предельных разведений с пересевом на чашки и заливом дифференциально-диагностической средой. Поскольку основную микрофлору закваски составляют термофильные молочнокислые палочки, то для анализа выбрана агаризованная питательная среда MRS.

Микрофлора закваски относится к группе условно анаэробных микроорганизмов, поэтому для определения количества клеток создавались условно анаэробные условия. Учет проводили методом подсчета и микроскопирования.

Результаты и обсуждение

В результате исследований антагонистической активности хлебопекарных промышленно ценных штаммов были установлены антимикробные свойства термоустойчивых метаболитов молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* в отношении плесневых, дрожжеподобных грибов, вызывающих порчу хлебобулочных изделий. По отношению к *P. roqueforti*, *P. funiculosum* и ВМБХ (наиболее типичных возбудителей микробной порчи хлеба из смеси ржаной и пшеничной муки) наибольшая антагонистическая активность выявлена в модельной среде на основе штамма *L. acidophilus* A-146.

В результате экспериментальных работ установлена оптимальная дозировка разработанной закваски при приготовлении хлебобулочных изделий, для повышения их хранимостойкости. Результаты исследований по обеспечению антагонистической активности по отношению к возбудителям микробной порчи хлеба приведены в таблице 1.

Данные экспериментов показали, что в модельной среде на основе штамма *L. acidophilus* A-146 во всех опытах выявлена антагонистическая активность в отношении исследуемых тест-штаммов *P. Funiculosum* и *P. roqueforti* (развития плесневых грибов не обнаружено). В модельной среде на основе

L. brevis B-1 наблюдали полное ингибирование роста *P. funiculosum* и 50%-ное – *P. roqueforti*. Антифунгальная активность метаболитов остальных штаммов МКБ варьировалась от 0 до 75%.

Наибольшая антагонистическая активность к *B. subtilis* 40 выявлена у штамма *L. Plantarum*30 – диаметр зоны подавления роста *B. subtilis* 40 составил 13 мм; у *L. acidophilus* A-146 и *L. brevis* B1 диаметр зоны в среднем составил 10 мм (за вычетом диаметра самой лунки). *L. delbrueckii* T2 и *L. casei* C-1 также проявили антимикробную активность и образовали зону ингибирования роста *B. Subtilis* 40 (5 мм).

При изучении антагонистической активности термоустойчивых метаболитов МКБ в отношении ВМБХ установлено наиболее активное подавление роста ВМБХ-1 в модельной среде на основе *L. acidophilus* A-146 (концентрация дрожжеподобных грибов на 53% меньше, чем в контроле). Остальные МКБ ингибировали рост ВМБХ-1 в среднем на 30%.

По отношению к *P. roqueforti*, *P. funiculosum* и ВМБХ-1 наибольшая антагонистическая активность выявлена в модельной среде на основе *L. acidophilus* A-146.

Таким образом, для дальнейших исследований был выбран штамм МКБ *L. acidophilus* A-146, который обладал наибольшими антимикробными свойствами.

Таблица 1.

Антагонистическая активность штаммов молочнокислых бактерий
в отношении возбудителей микробной порчи хлеба

Table 1.

Antagonistic activity of strains of lactic acid bacteria in relation to the causative agents
of microbial spoilage of bread

Штаммы молочнокислых бактерий Strains of lactobacilli	Антагонистическая активность в отношении возбудителей Antagonistic activity against pathogens			
	плесени, % ингибирования mold, % inhibition		«картофельной» болезни хлеба, диаметр лунки, мм “Potato” disease of bread, diameter of the hole, mm	меловой болезни хлеба, %, концентрация дрожжеподобных грибов chalk disease of bread, %, concentration of yeast-like fungi
	<i>P. roqueforti</i>	<i>P. funiculosum</i>	<i>B. subtilis</i> 40	ВМБХ
<i>L. delbrueckii</i> 40	25	0	0	65
<i>L. delbrueckii</i> T-2	50	100	5	68
<i>L. brevis</i> B-1	25	0	10	68
<i>L. brevis</i> 3	0	25	0	73
<i>L. casei</i> C-1	0	25	0	72
<i>L. casei</i> 5 L	50	0	5	83
<i>L. plantarum</i> A-63	0	0	0	71
<i>L. plantarum</i> Pl-30	25	50	13	87
<i>L. acidophilus</i> A-146	100	100	10	48
<i>L. fermenti</i> F-34	0	0	0	73
Контроль	0	0	0	100

На первом этапе подвергалась исследованию закваска без использования штамма МКБ *L. acidophilus* A-146. Полученные реологические результаты представлены в виде кривых зависимости γ от τ на рисунке 2 и 3. Кривые, представленные на рисунке 2 соответствуют этапу созревания закваски, а на рисунке 3 – ее хранению.

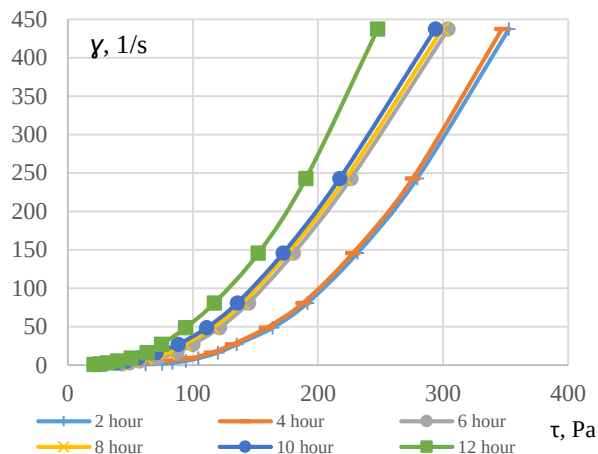


Рисунок 2. Кривые течения, полученные в процессе созревания закваски без использования штамма МКБ *L. acidophilus* A-146

Figure 2. Flow curves obtained during the ripening of the ferment without the use the strain of the lactobacilli *L. acidophilus* A-146

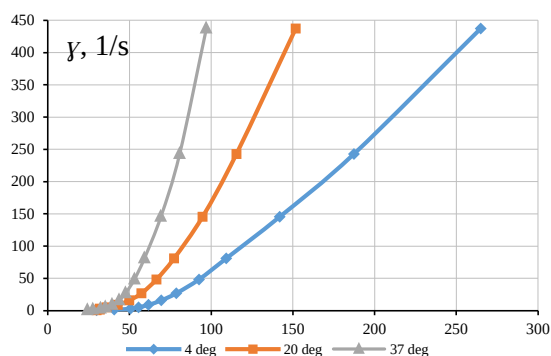


Рисунок 3. Кривые течения, полученные в процессе хранения закваски без использования штамма МКБ *L. acidophilus* A-146

Figure 3. Flow curves obtained during the storage of ferment without the use the strain of the lactobacilli *L. acidophilus* A-146

Из рисунка 2 видно, что с течением времени вязкость резко падает в начальный период, затем наблюдается ее незначительное снижение с резким уменьшением на заключительном этапе. Это объясняется протекающими в среде химическими реакциями.

Рисунок 3 показывает, что повышение температуры хранения снижает напряжение сдвига, следовательно, уменьшается вязкость закваски.

На следующем этапе подвергалась исследованию закваска с добавлением штамма МКБ *L. acidophilus* A-146. Полученные реологические результаты представлены в виде кривых

зависимости γ от τ на рисунке 4 и 5. Кривые, представленные на рисунке 4, соответствуют этапу созревания закваски, а на рисунке 5 – ее хранению.

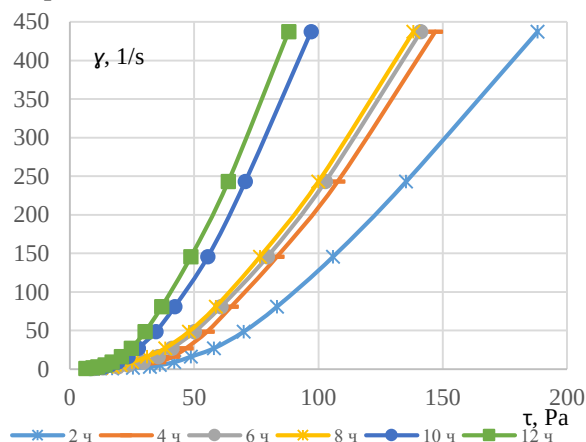


Рисунок 4. Кривые течения, полученные в процессе созревания закваски с использованием штамма МКБ *L. acidophilus* A-146

Figure 4. Flow curves obtained during the ripening of the ferment using the strain of the lactobacilli *L. acidophilus* A-146

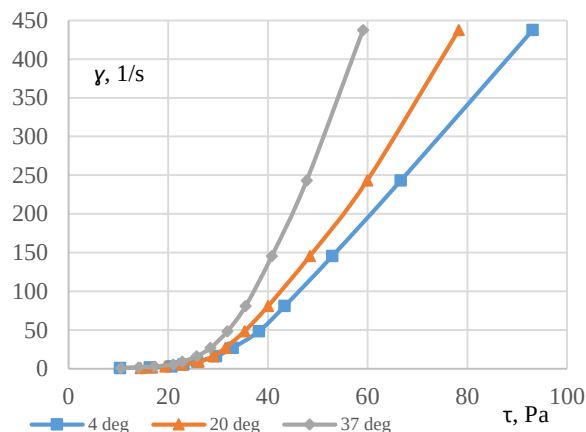


Рисунок 5. Кривые течения, полученные в процессе хранения закваски с использованием штамма МКБ *L. acidophilus* A-146

Figure 5. Flow curves obtained during the storage of ferment using the strain of the lactobacilli *L. acidophilus* A-146

Из рисунка 4 видно, что внесение штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 способствует постепенному изменению структуры закваски. Скачкообразность распределения показателей вязкости значительно снизилась. Так же уменьшился показатель напряжения сдвига, это говорит о снижении вязкости с течением времени созревания активированной закваски практически в 3 раза.

Рисунок 5 показывает, что внесение штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 уменьшает влияние температуры на структуру закваски, она становится более стабильной. Напряжение сдвига в процессе хранения закваски на основе штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 уменьшилось, что говорит о сокращении ее вязкости почти в 2 раза.

Анализируя кривые на рисунках 4 и 5 можно сделать вывод о том, что образцы закваски относятся к неньютоновским или аномально-вязким жидкостям, описываемым реологическим уравнением Оствальда-де-Вале, которое в общем виде записывается:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

где τ – напряжение сдвига, Па; K – коэффициент консистенции, пропорциональный вязкости; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ; n – индекс течения.

Полученные значения коэффициентов представлены в таблице 2 и 3.

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о том, что индекс течения n , показывающий степень аномалии вязкости, в течение всего периода изменялся незначительно. Внесение штамма МКБ *L. acidophilus*

A-146 способствует уменьшению вязкости в процессе созревания почти в 3 раза, а при хранении образцов – в 2 раза, о чем свидетельствует значение коэффициента консистенции K . Штамм МКБ *L. acidophilus* A-146 снижает влияние температуры, поэтому структура закваски становится более стабильной. В таком состоянии она легче подвергается дальнейшей переработке. Следовательно, добавление штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 в закваску для производства хлебобулочных изделий специализированного назначения значительно снижает энергозатраты на весь процесс производства и приводит к увеличению срока годности.

Далее закваска на основе штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 подвергалась высушиванию на терморадационной, конвективной и сублимационной сушилках при различных температурах сушильного агента.

Таблица 2.

Значение коэффициентов в процессе созревания закваски

Table 2.

The value of the coefficients during the ferment ripening

№	Наименование образца Sample Name	Коэффициенты Coefficients	Время измерения, ч Measurement time, h					
			2	4	6	8	10	12
1	контроль	K	59,81	41,69	30,91	25,58	22,85	20,49
2	(без использования штамма МКБ <i>L. acidophilus</i> A-146)	n	0,27	0,35	0,36	0,40	0,41	0,40
3	с использованием штамма МКБ	K	19,03	13,34	10,93	9,82	8,39	6,87
4	<i>L. acidophilus</i> A-146	n	0,35	0,38	0,41	0,42	0,38	0,40

Таблица 3.

Значение коэффициентов в процессе хранения закваски

Table 3.

The value of the coefficients during the storage of the ferment

№	Наименование образца Sample Name	Коэффициенты Coefficients	Температура хранения, °C Storage temperature, °C		
			4	20	37
1	контроль	K	39,31	19,03	24,29
2	(без использования штамма МКБ <i>L. acidophilus</i> A-146)	n	0,30	0,37	0,21
3	с использованием штамма МКБ	K	19,03	14,28	12,28
4	<i>L. acidophilus</i> A-146	n	0,35	0,26	0,25

При высушивании закваски на терморадационной сушилке использовались температуры 50 и 55 °C. Проба облучалась инфракрасными лучами с длиной волны 0,8–12 мкм. Высушиванию подвергались образцы массой 5 грамм в течение 3 часов. В каждом эксперименте производилось взвешивание навески с периодичностью в 5 секунд до тех пор, пока масса не станет постоянной.

Полученные данные в виде кривых сушки представлены на рисунке 6, из которых видно, что при температуре сушки 50 °C начальная влажность образца составляет 60,75%. Начальный этап сопровождается расходом тепла на нагрев материала, при этом влажность снижается

незначительно. Затем следует первый этап сушки, сопровождаемый испарением влаги со свободной поверхности закваски. Когда влага полностью удалена, происходит ее испарение из капилляров навески. При этом влажность закваски интенсивно уменьшалась по прямолинейной зависимости. После этого начинается второй период сушки, при котором температура закваски остается постоянной, а испарение влаги происходит равномерно. Этот период заканчивается при критической влажности. На последнем этапе скорость сушки постепенно снижается до наступления динамического равновесия. При этом испарение свободной и механически связанной влаги прекращается. Внутри образца

остается химически связанная влага, которая не удаляется при температуре 50 °С. В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных кривая сушки описывается уравнением:

$$W_c = 0,0015t^2 - 0,6105t + 91,188, \quad (1)$$

где W_c - влагосодержание после сушки, %; t - время сушки, мин.

Множественный коэффициент детерминации у модели, описываемой уравнением 1, $R^2 = 0,9987$. Это значит, что доля дисперсии зависимой переменной составляет 99,87%.

При температуре сушки 55 °С на первом этапе происходит прогрев закваски. Затем начинается период постоянной скорости сушки. Несмотря на незначительное повышение температуры по сравнению с первым образцом скорость сушки во втором периоде второй навески возрастает более чем в 2 раза. В этом периоде происходило равномерное удаление свободной и механически связанной влаги. Затем процесс сушки выходит на стационарный режим, а ее кривая асимптотически приближается к значению равновесной влажности при заданных условиях процесса. Время сушки при температуре 55 °С сократилось на 40–50 минут по сравнению с процессом сушки при 50 °С. Данная кривая сушки описывается уравнением:

$$W_c = 0,0033t^2 - 0,8948t + 89,884. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации у модели, описываемой уравнением 2, достаточно высок - $R^2 = 0,9887$.

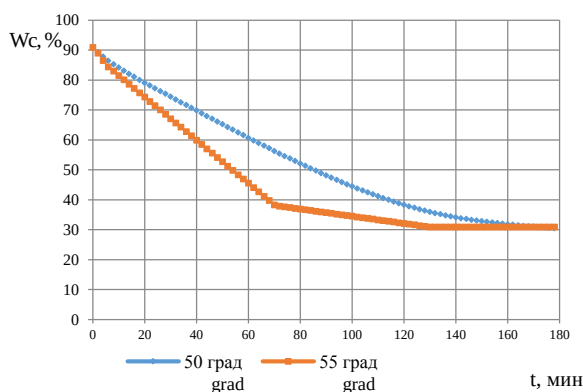


Рисунок 6. Кривые сушки закваски на основе штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 (терморрадиационная сушилка)

Figure 6. Drying curves of ferment based on lactobacilli *L. acidophilus* A-146 (thermoradiation dryer)

При высушивании закваски на конвективной сушилке применяли сушильный агент, нагретый до температур 55, 60 и 65 °С. При этом влажность навески составляла 54,5%. Пробы с массой 3 грамма высушивали до постоянного веса со взвешиванием навески каждые две минуты. По полученным данным было определено изменение текущей влажности в закваске с течением времени. Результаты в виде кривых сушки представлены на рисунке 7.

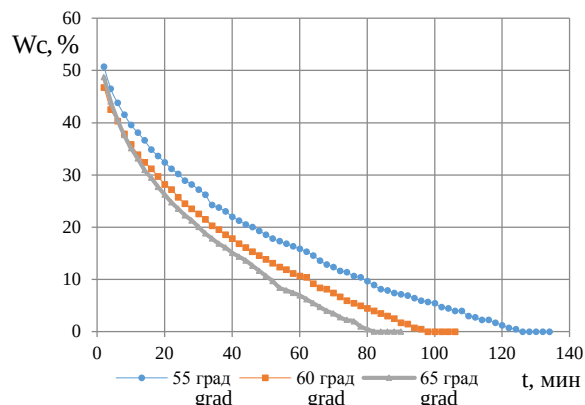


Рисунок 7. Кривые сушки закваски на основе штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 (конвективная сушилка)

Figure 7. Drying curves of ferment based on lactobacilli *L. acidophilus* A-146 (convection dryer)

Анализ кривых сушки показал, что при температуре 55 °С время сушки закваски до постоянного веса составляет 2 часа 14 минут, при этом она теряет 100% влаги. При температуре 60 °С время сушки сокращается на 30 минут, однако потеря влаги при этом аналогична предыдущему случаю. Увеличение температуры до 65 °С приводит к сокращению времени сушки на 46 минут по отношению к первому опыту. Влажность закваски полностью удалена, материал абсолютно сухой.

Кривые сушки, полученные конвективным способом, описываются следующими уравнениями:

- при $t = 55$ °С

$$W_c = 0,0024t^2 - 0,6518t + 45,835, \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9907;$$

- при $t = 60$ °С

$$W_c = 0,0034t^2 - 0,7702t + 43,585, \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9931;$$

- при $t = 65$ °С

$$W_c = 0,0053t^2 - 0,9785t + 45,38, \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9908;$$

Множественные коэффициенты детерминации у моделей высоки и показывают, что они с достаточной точностью описывают процесс сушки.

Третья проба подвергалась сублимационной (лиофильной) сушке. Для этого закваску массой 2 грамма расфасовывали в стерильные стеклянные флаконы, закрывали с соблюдением стерильности и замораживали при температуре (-18 °С). После полного замораживания флаконы подвергали вакуумированию. В процессе вакуумной сушки при удалении из образцов влаги происходило сублимирование (лиофилизация). Полученные концентраты герметично упаковывали.

После сушки активированной закваски определено количество микроорганизмов полезной микрофлоры в 1 г каждого высушенного образца закваски. Анализ полученных данных показал, что во всех образцах количество клеток не превысило $1 \cdot 10^6$ КОЕ/г. Например, в образцах

закваски, подвергнутых терморadiационному высушиванию, количество клеток составляло $(2-6) \cdot 10^4$ КОЕ/г, в образцах, полученных при конвективной сушке $(5-9) \cdot 10^5$ КОЕ/г. В то время как при сушке терморadiационным методом титр полезной микрофлоры показал $1 \cdot 10^5$ КОЕ/г, что ниже в десять раз по отношению к двум другим видам сушки. Учитывая, что температура проведения процесса не является разрушающей для заквасочных микроорганизмов – вероятнее всего пониженная выживаемость микрофлоры связана именно с радиационной активностью ламп.

Выводы

В результате исследований антагонистической активности хлебопекарных промышленно ценных штаммов были установлено, что наибольшими антимикробными свойствами обладает штамм МКБ *L. acidophilus* A-146.

Внесение штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 в закваску приводит к уменьшению вязкости в процессе созревания почти в 3 раза, а при хранении – в 2 раза, что способствует стабилизации ее

структуры. Это в свою очередь снижает энергозатраты при производстве хлебобулочных изделий и приводит к увеличению срока годности.

Наиболее благоприятной для высушивания закваски на основе штамма МКБ *L. acidophilus* A-146 является конвективная. Наилучшие результаты здесь достигаются по истечении 46 мин при температуре сушильного агента 65 °С.

Анализ экспериментальных данных показал, что наименьшему разрушающему воздействию подвергаются микроорганизмы при конвективной и сублимационной (лиофильной) сушке. Выживаемость микроорганизмов при этих способах концентрирования максимальна. Микробный титр в данных образцах составляет не менее $1 \cdot 10^5$ КОЕ/г.

Полученные результаты могут быть использованы в технологии приготовления закваски на основе штамма *Lactobacillus acidophilus* A-146 для ее рационального использования в производстве хлебобулочных изделий из смеси ржаной и пшеничной муки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Быковченко Т.В., Костюченко М.Н., Волохова Л.Т., Работкин Ю.В. и др. Разработка системы обеспечения микробиологической безопасности хлебобулочных изделий на хлебопекарных предприятиях // Кондитерское и хлебопекарное производство. 2012. № 9. С. 22–24.
- 2 Saranraj P., Geetha M. Microbial Spoilage of Bakery Products and Its Control by Preservatives // International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives. 2012. V. 3. № 1. P. 38–48.
- 3 Liam A.M.R., Zannini E., Dal Bello F., Pawlowska A. et al. Lactobacillus amylovorus DSM 19280 as a novel food-grade antifungal agent for bakery products // International Journal of Food Microbiology. 2011. V. 146. № 3. P. 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.02.036>.
- 4 Иванова Е.П., Митрохин М.А., Перфилова О.В., Родионов Ю.В. и др. Разработка технологии закваски для производства хлеба функционального назначения // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И.Вернадского. 2014. № 1 (50). С. 260–264. doi: 10.17277/issn.1990-9047.
- 5 Невская Е.В., Шлеленко Л.А., Бородулин Д.М. Оптимизация рецептурного состава хлебобулочных изделий для спортивного питания // Техника и технология пищевых производств. 2015. № 1 (36). С. 60–64.
- 6 Ziobro R, Witczak T., Juszcak L., Korus J. Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic // Food Hydrocolloids. 2013. V. 32. № 2. P. 213–220.
- 7 Иркитова А.Н., Каган Я.Р., Соколова Г.Г. Сравнительный анализ методов определения антагонистической активности молочнокислых бактерий // Известия Алтайского государственного университета. 2012. № 3–1(75). С. 41–44.
- 8 Бородулин Д.М., Невская Е.В., Непомнящая Т.И. Определение оптимального вида сушки закваски для производства хлебобулочных изделий // Материалы II Международной научно-практической конференции «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств», Воронеж, 16–17 ноября, 2016. С. 419–425.

- 9 Maisnam D., Rasane P., Dey A., Kaur S. et al. Recent advances in conventional drying of foods // Journal of Food Technology and Preservation. 2017. № 1. P. 25–34.

- 10 Peiren J., Hellemans A., De Vos P. Impact of the freeze-drying process on product appearance, residual moisture content, viability, and batch uniformity of freeze-dried bacterial cultures safeguarded at culture collections // Applied Microbiology and Biotechnology. 2016. V. 100. № 14. P. 6239–6249. doi:10.1007/s00253-016-7359-1.

- 11 Магомедов Г.О., Зацепина Н.П., Журавлев А.А., Чешинский В.Л. Разработка сбивного хлеба функционального назначения из муки цельнозернового зерна пшеницы, ржаных и пшеничных отрубей // Вестник ВГУИТ. 2015. № 4. С. 104–108.

- 12 Пономарева Е.И., Алехина Н.Н., Малютин Т.Н., Журавлева И.А. Влияние способа подготовки зерна ржи на его микроструктуру и показатели безопасности // Вестник ВГУИТ. 2014. №1. С. 119–122.

REFERENCES

- 1 Bykovchenko T.V., Kostyuchenko M.N., Volokhova L.T., Rabotkin Yu.V. et al. Development of a system for ensuring the microbiological safety of bakery products at bakery enterprises. *Konditerskoe i khlebopekarnoe proizvodstvo* [Confectionery and bakery production], 2012, no. 9, pp. 22–24. (in Russian)
- 2 Saranraj P., Geetha M. Microbial Spoilage of Bakery Products and Its Control by Preservatives. *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives*, 2012, vol 3, no 1, pp. 38–48. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160511001164>.
- 3 Liam A.M. Ryan, Emanuele Zannini, Fabio Dal Bello, Agata Pawlowska et al. Lactobacillus amylovorus DSM 19280 as a novel food-grade antifungal agent for bakery products. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, vol. 146, issue 3, pp. 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.02.036>.
- 4 Ivanova E.P., Mitrokhin M.A., Perfilova O.V., Rodionov Yu. V. et al. Development of the technology of starter for the production of bread of functional purpose. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im.*

V.I.Vernadskogo. [Issues of modern science and practice. University of. V.I.Vernadsky], 2014, no. 1 (50), pp. 260–264. doi: 10.17277/issn.1990-9047. (in Russian)

5 Nevskaya E.V., Shlelenko L.A., Borodulin D.M. Optimization of the formulation composition of bakery products for sports nutrition. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technology and technology of food production] 2015, no. 1 (36), pp. 60–64. (in Russian)

6 Rafał Ziobro, Teresa Witczak, Lesław Juszcak, Jarosław Korus. Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic. *Food Hydrocolloids*, 2013, vol. 32, issue 2, pp. 213–220.

7 Irkitova A.N., Kagan Ya.R., Sokolova G.G. A Comparative Analysis of Methods for Determining the Antagonistic Activity of Lactic Acid Bacteria. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya Altai State University], 2012, no. 3–1(75), pp. 41–44. (in Russian)

8 Borodulin D.M., Nevskaya E.V., Nepomnyashchaya T.I. Determination of the optimal type of drying of the starter for the production of bakery products. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Yavleniya perenosa v protsessakh i apparatakh khimicheskikh i pishchevykh proizvodstv»*, Voronezh, 16–17 noyabrya, 2016 [Proceedings of the II

International Scientific and Practical Conference "Transport phenomena in the processes and devices of chemical and food industries", Voronezh, November 16–17, 2016] pp. 419–425. (in Russian)

9 Daniel Maisnam, Prasad Rasane, Anirban Dey, Sawinder Kaur, Chayanika Sarma. Recent advances in conventional drying of foods. *Journal of Food Technology and Preservation*, 2017, no 1, pp. 25–34.

10 Jindrich Peiren, Ann Hellemans, Paul De Vos. Impact of the freeze-drying process on product appearance, residual moisture content, viability, and batch uniformity of freeze-dried bacterial cultures safeguarded at culture collections. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, vol. 100, issue 14, pp 6239–6249. doi:10.1007/s00253-016-7359-1.

11 Magomedov G.O., Zatsepilina N.P., Zhuravlev A.A., Cheshinskii V.L. Development of a functional purpose whipped bread whole grain wheat, rye and wheat bran. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET] 2015, no. 4, pp. 104–108. (in Russian)

12 Ponomareva E.I., Alekhina N.N., Malyutina T.N., Zhuravleva I.A. Effect of the method of preparation of rye grain on its microstructure and safety indicators. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET] 2014, no. 1, pp. 119–122. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий М. Бородулин д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, borodulin_dmitri@list.ru

Елена А. Сафонова к.т.н., доцент, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, safonova.kem@yandex.ru

Екатерина В. Невская к.т.н., заместитель заведующей отделом, отдел технологии хлебопекарного производства, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, ул. Б.Черкизовская, 26-А, г. Москва, 107553, Россия, katerinarose@mail.ru

Маргарита Т. Шулбаева к.т.н., доцент, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, sh-m-t@yandex.ru

Денис В. Доня к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, doniadv@rambler.ru

Татьяна И. Непомнящая магистрант, кафедра технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, matmodeli@yandex.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 19.10.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 21.11.2017

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitrii M. Borodulin Dr. Sci. (Engin.), head of the department, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia, borodulin_dmitri@list.ru

Elena A. Safonova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia, safonova.kem@yandex.ru

Ekaterina V. Nevskaya Cand. Sci. (Engin.), deputy head of the department, bakery technology department, Scientific Research Institute of the Bakery Industry, B. Cherkizovskaya str., 26A, Moscow, 107553, Russia, katerinarose@mail.ru

Margarita T. Shulbaeva Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia, sh-m-t@yandex.ru

Denis V. Donya Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and apparatus of technological systems department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, 47 Stroiteley Boulevard, Kemerovo, 650056, Russia, doniadv@rambler.ru

Tat'yana I. Nepomnyashchaya master student, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, 47 Stroiteley Boulevard, Kemerovo, 650056, Russia, matmodeli@yandex.ru

CONTRIBUTION

All authors equally participated in writing the manuscript and responsible for the plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 10.19.2017

ACCEPTED 11.21.2017