

Т.А. Савельева, О.В. Дымар, Л.Л. Богданова

Институт мясо-молочной промышленности, Минск, Республика Беларусь

МЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Переработка отходов и вторичных ресурсов на любом производстве в настоящее время является ключевым моментом повышения его экономической эффективности. При производстве бактериальных концентратов для молочной промышленности, налаженном в РУП "Институт мясо-молочной промышленности", основным проблемным ресурсом является барда, которая в значительных количествах образуется в процессе концентрирования микробной биомассы. Она содержит протеины, свободные аминокислоты, широкий спектр витаминов группы В, макро и микроэлементов, а также живые клетки лакто- или бифидобактерий, или пропионовокислых микроорганизмов и может быть использована в рационах питания сельскохозяйственных животных. Рациональным способом ее переработки видится производство сухой кормовой добавки. В связи с низким содержанием сухих веществ в исходной барде, на начальном этапе концентрирования целесообразным является использование мембранных методов.

Основной целью данной работы явилось изучение процесса мембранного концентрирования микробиальной барды.

Материалы и методы. Работа проводилась на лабораторной НФ мембранной установке с рабочим давлением до 2,5 МПа. Концентрирование барды в ходе исследований осуществлялось на 4" рулонном элементе с полисульфонным фильтрующим слоем паспортной селективностью 300 Да, поверхностью фильтрации 7,4 м², надмембранный поток рециркуляции был установлен 6,8 м³/ч, что обеспечивало рекомендуемый перепад давления до/после мембранного модуля 0,1 МПа. Объектом исследований были выбраны различные виды

микробиальной барды, образующейся при культивировании микроорганизмов видов *Lactobacillus acidophilus*, *Propionibacterium*, *Lactobacillus bulgaricus* и заквасочных комбинаций на основе микроорганизмов рода *Lactococcus*. Отделение биомассы микроорганизмов от питательной среды проводилось на центрифуге ОТР–102К–01. Содержание сухих веществ в барде составило 6,7-11,0 %, содержание белка – от 3,7 % до 3,9 %.

1. Концентрирование остаточной микрофлоры

Определяющим параметром эффективности процесса концентрирования является фактор концентрирования (коэффициент концентрирования – КК) по целевому параметру. Коэффициент концентрирования – отношение конечного содержания целевого компонента в концентрате к его содержанию в исходном растворе. В связи с тем, что размер микроорганизмов значительно больше пор, разумно предположить наличие корреляции между КК по объему и КК по количеству микроорганизмов (табл. 1).

Таблица 1 – Содержание микроорганизмов в барде, фильтрате и концентрате

Вид микроорганизмов	Количество микроорганизмов в барде, КОЕ/см ³	Количество микроорганизмов в фильтрате, КОЕ/см ³	Количество микроорганизмов в концентрате, КОЕ/см ³	КК по объему	КК по количеству микроорганизмов
<i>Lactobacillus acidophilus</i>	$6,8 \times 10^7$	$2,5 \times 10^4$	$2,8 \times 10^8$	2,8	4,1
<i>Propionibacterium</i>	$2,4 \times 10^6$	2×10^4	$2,1 \times 10^7$	3,3	8,8
<i>Lactococcus</i>	$4,9 \times 10^7$	<1500	$4,4 \times 10^8$	4,1	9,0
<i>Lactobacillus bulgaricus</i>	$1,7 \times 10^3$	<100	$1,0 \times 10^4$	3,9	5,9

Результаты экспериментов показали, что порядок КК по объему и КК по количеству микроорганизмов совпадает. Большой КК по количеству микроорганизмов можно объяснить тем, что, вероятно, и при низких температурах мембранного концентрирования продолжается рост

бактерий, кроме того, интенсивное механическое воздействие приводит к дроблению агломератов бактерий, вызывая увеличение количества колониобразующих единиц. Определено количество микроорганизмов, отходящих в фильтрат. Оно на 2-5 порядков меньше количества микроорганизмов в концентрате.

2. Давление

Изучение влияния **рабочего давления над мембраной** проводилось на барде, получаемой при выработке бактериальных концентратов на основе пропионовокислых бактерий (*Propionibacterium ssp.*) и лактококков (комбинация, предназначенная для изготовления бактериального концентрата для творога, состоящая из 5 штаммов *Lactococcus ssp.*). После отделения биомассы пропионовокислых бактерий и биомассы лактококков от культуральной жидкости была получена барда с содержанием сухих веществ 10,4 % и 10 % соответственно. Содержание жизнеспособных клеток *Propionibacterium ssp.* составило $2,4 \cdot 10^6$ КОЕ/см³, *Lactococcus ssp.* – $4,9 \cdot 10^7$ КОЕ/см³.

Выбор рабочего давления зависит от вида процесса, природы и концентрации веществ в разделяемом растворе, типа используемой мембраны, конструкции аппарата и др. С увеличением давления возрастает эффективная движущая сила процесса и, соответственно, повышается удельная производительность установки.

В ходе опытов установлено, что в исследуемом диапазоне изменения давления существует практически линейная зависимость удельной производительности от давления (табл. 2). Вместе с тем, процесс концентрирования при низком давлении достаточно быстро прекращается, не давая получить высокую концентрацию сухих веществ. Это легко объясняется возрастающим осмотическим давлением раствора концентрата, которое препятствует отделению фильтрата, создавая осмотическое противодействие механическому давлению насосов. При

низком рабочем давлении равновесие устанавливается достаточно быстро. Влияние механического загрязнения на этом этапе фильтрования незначительно. Определяющую роль играет содержание относительно низкомолекулярных веществ.

Таблица 2 – Зависимость скорости фильтрации барды от давления на входе в мембрану

Давление, МПа	Скорость фильтрации, $\text{дм}^3/\text{м}^2/\text{ч}$					
	для пропионовокислых бактерий			для лактококков		
	начало процесса	середина процесса	окончание процесса	начало процесса	середина процесса	окончание процесса
1,2	11,8	0,3	-	4,3	0,3	-
1,5	13,0	1,7	-	5,0	1,7	-
1,8	16,2	2,9	0,62	6,6	4,35	2,74
2,5	25,0	8,6	1,2	10,45	6,42	3,8

3. Проведение сравнительной оценки показателей концентрирования барды, получаемой при производстве бакконцентратов на основе микроорганизмов с различными морфологическими особенностями

На следующем этапе работы проведена оценка технологических параметров процесса концентрирования барды, получаемой при производстве бакконцентратов на основе микроорганизмов различных таксономических групп (*Lactobacillus acidophilus*, *Propionibacterium*, *Lactobacillus bulgaricus* и заквасочных комбинаций на основе микроорганизмов рода *Lactococcus*). Основными показателями процесса концентрирования барды являются выход концентрата, содержание массовой доли сухих веществ, производительность установки (табл. 3).

Удельная скорость фильтрации (табл. 3) по мере концентрирования уменьшилась примерно в три раза независимо от вида микроорганизмов (например, с 12,2 до 4,1 $\text{дм}^3 \times \text{м}^2/\text{ч}$ для ацидофильной палочки, с 11,9 до 3,7 $\text{дм}^3 \times \text{м}^2/\text{ч}$ для лактококков и т.п.). Исключение составил процесс концентрирования барды пропионовокислых бактерий: скорость

фльтрации по мере концентрирования уменьшилась с 16,2 до 0,6 $\text{дм}^3 \times \text{м}^2 / \text{ч}$, т.е. в 27 раз. При этом исходное содержание сухих веществ в барде пропионовокислых бактерий было несколько выше, чем в барде ацидофильной или болгарской палочки (10,4 %; 9,4 % и 8 % соответственно). Средняя скорость выхода фильтрата составила 7,2 $\text{дм}^3 \times \text{м}^2 / \text{ч}$. При этом кратность концентрирования или коэффициент уменьшения объема (отношение объема барды к объему полученного концентрата) составил 2,4-4,1.

Зависимость изменения содержания сухих веществ в концентрированной барде и фильтрате является обратной и линейной. Зависимость содержания сухих веществ в фильтрате и концентрируемом продукте от времени также является линейной, причем скорость увеличения содержания сухих веществ в фильтрате также прямо пропорциональна скорости увеличения содержания сухих веществ в концентрированном продукте.

Таблица 3 – Технологические параметры НФ барды. Рабочее давление 1,8 Мпа

Вид микроорганизмов, исходные СВ, %	Время процесса, мин	Температура продукта, °С	Производительность по фильтрату, $\text{дм}^3 / \text{ч}$	Содержание СВ в фильтрате, %	Содержание СВ в сгущенном продукте, %
1	2	3	4	5	6
<i>Lactobacillus acidophilus</i> , 9,4%	10	27,2	90	1,6	–
	22	31,8	60	–	–
	29	–	–	2,7	15,8
	33	38,8	43	–	–
	41	–	–	3,9	17,8
	50	–	30,5	–	–
	55	42	–	5	21,4
<i>Propionibacterium freudenreichi</i> , 10,4%	5	27,2	120	–	–
	8	30,9	–	1,6	13,6
	11	–	63,2	–	–
	18	–	21,4	2,9	16,2
	24	36,1	11,7	–	–
	28	35,3	9,1	5,1	17,1
	35	–	4,6	5,8	17,3

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6
<i>Lactococcus</i> , 6,7 %	6	–	48,6	4,4	–
	12	27	–	–	10,2
	15	26	–	–	–
	20	–	47,3	5,0	–
	24	25	–	–	10,8
	30	–	–	4,8	–
	45	24	33,9	–	11,8
	60	–	32,2	4,9	13,0
	75	22	28,5	5,1	13,8
	90	–	25,7	5,1	14,5
	105	22	–	5,8	15,9
	120	20,5	20,3	–	16,7
<i>Lactobacillus bulgaricus</i> , 8,0 %	6	21	128,6	–	–
	8	24	–	1,0	8,8
	16	–	83,7	–	–
	18	23	–	1,2	10,0
	27	–	59,0	1,6	12,0
	37	–	37,1	2,2	14
	47	–	29,5	2,6	15,2
	53	20,5	–	–	15,8

В ходе процесса разделения на мембранах наблюдается явление концентрационной поляризации, обусловленное тем, что скорость прохождения компонентов барды через мембрану различна. При этом в пограничном слое вблизи поверхности мембраны накапливаются вещества, имеющее наименьшую скорость проникания. В результате, при разделении жидких смесей снижаются движущая сила процесса и производительность мембран. Кроме того, вероятно осаждение на мембране солей с малой растворимостью, а также гелеобразование высокомолекулярных соединений, что делает необходимым периодическую очистку мембран.

На следующем этапе работы исследовали возможность сгущения концентрата барды, получаемой при производстве бакконцентратов на основе микроорганизмов рода *Lactococcus* и *L. bulgaricus*, на лабораторной вакуум-выпарной установке при следующих режимных параметрах: давление – $(0,220 \pm 0,007)$ ГПа, температура нагревающей воды – $(74,9 \pm 2,4)$ °С, температура выпаривания – $(60,6 \pm 2,1)$ °С (рис. 1).

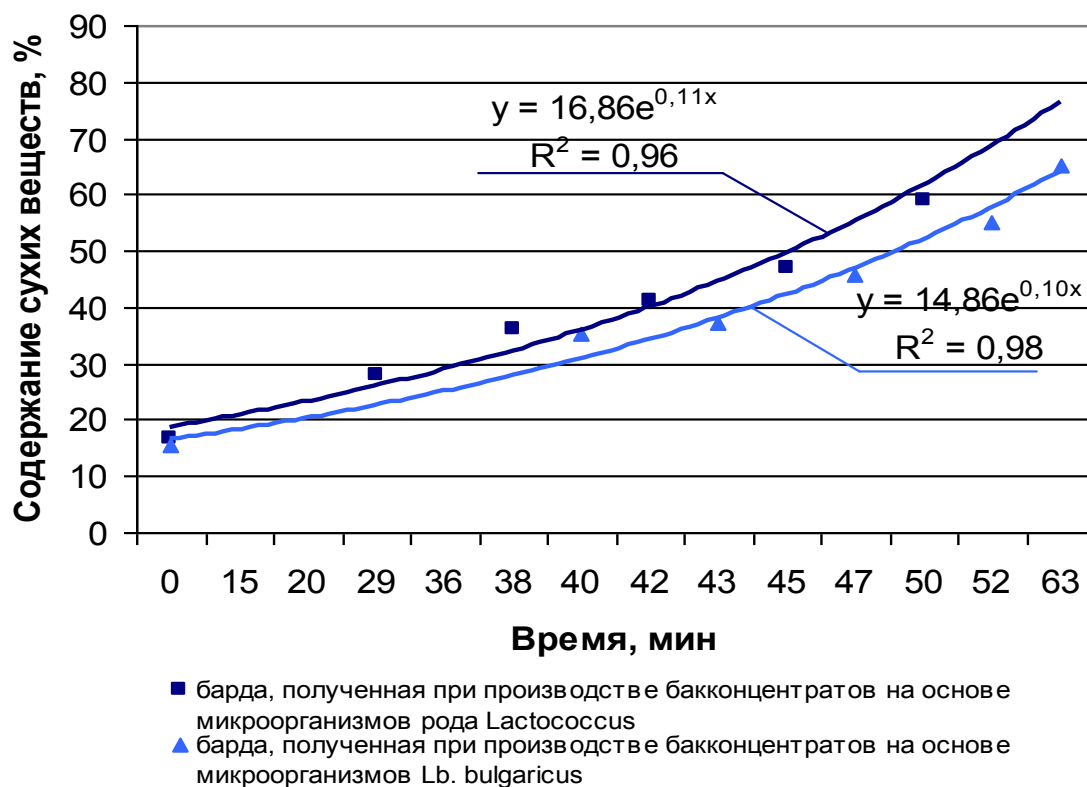


Рисунок 1 – Изменение содержания сухих веществ при сгущении концентрированной барды на основе микроорганизмов рода *Lactococcus* и *Lb. bulgaricus*

При сгущении концентрированной барды может быть получен продукт с содержанием сухих веществ до 59-65 %. Технически вредных и условно-патогенных микроорганизмов в сгущенной барде не обнаружено, однако и выживаемость микроорганизмов незначительна (<100 КОЕ/см³ для лактококков и 2·10³ КОЕ/см³ для болгарской палочки). При этом кратность концентрирования или коэффициент уменьшения объема для лактококков равен 4,3 и 5,8 для болгарской палочки.

4. Определение компонентного состава вторичного сырья, получаемого при производстве бакконцентратов

Основные физико-химические показатели барды, получаемой при производстве бакконцентратов на основе микроорганизмов рода *Lactococcus*, ее концентрата, полученного способом нанофильтрации и впоследствии сгущенного на вакуум-выпарной установке (табл. 4).

Исследования показали, что при нанофильтрации наибольший фактор концентрирования имеют белки, пептиды и свободные аминокислоты, которые вместе определяются как общий белок. Это объясняется тем, что азотсодержащие соединения имеют молекулярный вес существенно выше пороговой селективности НФ-мембран. Фактор концентрирования по лактозе несколько ниже, так как некоторая часть, особенно на заключительных стадиях процесса, уходит в фильтрат. Фактор концентрирования, в целом по сухим веществам, несколько ниже в связи с существенным уходом в фильтрат минеральной и низкомолекулярной органической составляющей барды. Таким образом, нанофильтрация позволяет не только проводить предварительное концентрирование сухих веществ барды, но и корректировать соотношение ее компонентов, увеличив относительное содержание высокомолекулярных веществ в конечном продукте. В ходе досгущения концентрата барды на вакуум-выпарной установке не происходит изменения соотношения компонентного состава продукта, что подтверждается совпадением фактора концентрирования по основным компонентами и в целом по сухому веществу.

Таблица 4 – Основные физико-химические показатели барды, получаемой при производстве бакконцентратов лактококков, и продуктов на ее основе

Наименование показателя	Барда	Концентрат		Фильтрат	Сгущенный на ВВУ продукт	
	СВ, %	СВ, %	ФК	СВ, %	СВ, %	ФК
Массовая доля сухих веществ, %	8,7	15,2	1,75	2,2	56,1	3,7
Массовая доля общего белка, %	0,97	2,48	2,56	–	9,65	3,8
Массовая доля лактозы, %	3,90	7,28	1,86	0,6	25,4	3,5
Расчетный БПК ₅ , мг/кг	35 300	72 900	–	3900	264 000	–

Вывод. В ходе исследований установлены практические пределы концентрирования микробиальной барды на нанофильтрационной

установке. Они составляют 15-21 %. Выявлено, что главным, определяющим производительность и степень концентрирования, фактором при проведении процесса является давление над мембраной. Определено, что при концентрировании в фильтрат уходят минеральные соли и, частично, лактоза. Наиболее ценная часть – белок и свободные аминокислоты концентрируются, в такой же степени концентрируются и содержащиеся остаточные количества микроорганизмов. При этом количество колониеобразующих единиц примерно в 2-3 раза больше теоретически обусловленного исключительно процессом концентрирования, и чем выше температура фильтрования, тем больше количество микроорганизмов. Это объясняется продолжением их роста в ходе концентрирования, а так же увеличением количества колониеобразующих единиц под действием механического воздействия, приводящего к дроблению агломератов бактерий. Если целью процесса является получение жидкой пробиотической кормовой добавки, то целесообразно проведение процесса при температурах, оптимальных для роста культивируемого микроорганизма. Кроме того, повышенная температура процесса приводит к увеличению собственно скорости фильтрования.

Показано, что методом вакуум-выпаривания можно сконцентрировать барду до 59-65 %. При этом не происходит изменения соотношения между сухими компонентами барды, а микроорганизмы в большой степени инактивируются. В этой связи технологически вакуум-выпаривание целесообразно применять при создании сухих кормовых добавок из микробиальной барды, при условии, что наличие микроорганизмов в конечном продукте несущественно.

**MEMBRANE TECHNOLOGY CONCENTRATION WASTE
TREATMENT BIOTECHNOLOGICAL PRODUCTION**

Summary

Recycling of waste and secondary resources for any production at the present time is the key to improving its economic efficiency. In the production of bacterial concentrates for the dairy industry, streamlined in RUE "Institute of the meat and dairy industries," the main problem is the resource of the Bard, which is produced in significant quantities during the concentration of microbial biomass. It contains proteins, free amino acids, a wide variety of vitamins, macro and micronutrients, and live cells lactose or bifidobacteria or propionic acid and microorganisms can be used in diets of farm animals. Rational way of its processing is seen production of dry feed additive. Due to the low solids content in the original bard, the initial concentration, it is appropriate to use of membrane methods.