

УДК 579.66:663.54

DOI: 10.31040/2222-8349-2026-0-2-89-95

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБНОСТИ *KLUYVEROMYCES LACTIS*
И *KLUYVEROMYCES MARXIANUS* К ФЕРМЕНТАЦИИ ЛАКТОЗЫ
ПОДСЫРНОЙ СЫВОРОТКИ В ЭТАНОЛ**

© К.С. Аббас, В.В. Новочадов

Целью данного исследования было выявить особенности конверсии лактозы подсырной сыворотки дрожжами *Kluyveromyces lactis* и *Kluyveromyces marxianus* в этанол, как варианта экологической биотехнологии, в условиях изменения состава и свойств культуральной среды. Чтобы оценить различия, связанные с составом и свойствами сыворотки, в ней изменяли рН, концентрацию ионов марганца или кобальта. Основными характеристиками процесса были процент переработки лактозы, производство этанола и эффективность ферментации в течение 72 ч культивирования.

В результате штамм *K. lactis* Y-2037 в течение 72 ч уменьшал концентрацию лактозы в 9.89 раза, штамм *K. marxianus* Y-2042 – в 5.82 раза. Концентрация этанола в конечной среде 20.0 и 17.0 г/л, а эффективность ферментации составила 97.8 и 90.8% соответственно. Снижение рН среды до 4.2 не сопровождалось существенными изменениями показателей биотехнологического процесса, дальнейшее снижение рН до 3.9 уменьшало утилизацию лактозы, эффективность ферментации у *K. lactis* Y-2037 и *K. marxianus* Y-2042 снижалась на 9.7 и 8.0% соответственно. Повышение концентрации ионов марганца до 25 мг/л приводило к тому, что штаммы *K. lactis* Y-2037 и *K. marxianus* Y-2042 утилизировали 91.8 и 87.8% лактозы, образуя 20.5 и 18.2 г/л этанола соответственно. Эффективность ферментации при этом не менялась. Ионы кобальта в концентрациях 1 и 2 мг/л не оказывали какого-либо эффекта, а в концентрации 5 мг/л – снижали переработку лактозы штаммом *K. lactis* Y-2037 в 1.24 раза и *K. marxianus* Y-2042 – в 1.31 раза. Эффективность ферментации при этом снижалась в 1.22 и 1.28 раза соответственно.

Технологию переработки лактоза-содержащих отходов молочной промышленности путем конверсии лактозы в этанол дрожжевыми культурами *K. lactis* и *K. marxianus* предложено использовать для уменьшения объемов загрязнений, а в случае необходимости – для внутреннего производства биоэтанола.

Ключевые слова: молочная сыворотка, лактоза, ферментация, биоэтанол, *Kluyveromyces lactis*, *Kluyveromyces marxianus*.

Введение. Проблемы импортозамещения и параллельный дрейф пищевых потребностей населения привели к тому, что производство сыра в России за 10 лет увеличилось более чем в 1.5 раза и не имеет тенденции к сокращению темпов роста [1]. С экологических позиций это становится существенным фактором, поскольку даже в развитых странах до трети сыворотки, образующейся как вторичный продукт в этом производстве, не находит дальнейшего применения, а в странах с более низким доходом основная часть подсырной сыворотки сбрасывается без всякой переработки в близлежащие водоемы [2].

Наличие в составе сыворотки достаточно большого количества органических и минеральных веществ приводит в водных экосисте-

мах к запуску пищевых цепей, размножению микроорганизмов и микроводорослей, в итоге приводящих к истощению запасов растворенного кислорода, снижению рН и разрушению водных экосистем. Но ввиду этих же свойств сыворотка может быть использована в биотехнологии как удобный субстрат для переработки микроорганизмами с параллельным синтезом ценных продуктов [2, 3].

Концепция современных биотехнологических производств, которые приемлемы для утилизации различных отходов, предусматривает одновременный биосинтез каких-либо полезных продуктов, в результате чего сокращаются затраты и возникает возможность сформировать цепочку таких производств [4, 5]. В частности,

подсырная сыворотка может в процессе конверсии преобразовываться в этанол [6].

На практике для переработки лактозы, содержащейся в подсырной сыворотке, можно использовать природные штаммы с высокой активностью соответствующих ферментов, например дрожжи *Kluyveromyces* spp., или модифицировать другие промышленные штаммы микроорганизмов путем переноса необходимых генов от лактоза-перерабатывающих штаммов. Как для первого, так и для второго подхода наиболее часто используют штаммы дрожжей видов *Kluyveromyces lactis* и *Kluyveromyces marxianus* [7, 8].

Помимо выбора наиболее подходящего штамма, для обеспечения максимально эффективной переработки и предотвращения стресса, вызванного искусственными условиями существования, необходимо тщательно выверить физические, физико-химические параметры культивирования и состав питательной среды [9]. В последнее время исследователи в этом направлении все чаще обращаются к подбору оптимальных концентраций различных микроэлементов, таких как цинк, марганец, кобальт и др. [10].

Цель исследования – сравнить эффективность ферментации лактозы как этапа переработки подсырной сыворотки дрожжами *Kluyveromyces lactis* и *Kluyveromyces marxianus* оценить возможности ее повышения за счет изменения концентрации ионов марганца и кобальта в культуральной среде.

Материал и методы исследования. Депротеинизированная сыворотка была получена из ООО «Еланский сыродельный комбинат» и нормирована до содержания лактозы 40 г/л. Концентрация белка в такой сыворотке составляло менее 0.25 г/л, этанола – менее 0.2 г/л. К ней были добавлены ионы цинка в конечной концентрации 10 мг/л, для которых ранее показано стимулирующее воздействие на ферментацию лактозы дрожжами [11]. Этот материал считали базовой питательной средой (БПС). В работы использовали дрожжи *Kluyveromyces lactis* штамм Y-2037 и *Kluyveromyces marxianus* штамм Y-2042 из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов Национального биоресурсного центра России.

Инокулят выращивали на БПС, дополнительно содержащей 60 г/л сахарозы, 1% взвеси соевой муки и 5% гидролизата дрожжей *S. Cerevisiae*, куда помещали соответствующие

штаммы дрожжей из расчета 10^5 клеток/мл. Материал получали в течение 36 ч инкубации в стеклянных сосудах в орбитальном шейкере-термостате ES-20 (BioSan, Латвия) при температуре 34°C и скорости движения столика 100 в минуту. Финальный материал в каждом сосуде был нормализован до содержания дрожжей 10^8 клеток/мл и pH среды до 4.5. Основную ферментацию проводили в тех же условиях, что и приготовление инокулята, по 6 параллельных процессов в каждой серии. Соотношение инокулята и питательной среды составляло 1:30. В зависимости от конкретной серии, в БПС изменяли pH (4.5, 4.2 и 3.9), концентрацию ионов марганца (конечная концентрация в культуре 5, 10 или 25 мг/л) или кобальта (1, 2 или 5 мг/л). Культивирование занимало 72 ч, отбор проб и фиксацию показателей проводили непосредственно перед началом инкубации и спустя 12, 24, 48 и 72 ч.

Для определения концентрации лактозы и этанола в культуральной жидкости использовали спектрофотометр SmartSpectPlus (Bio-Rad Laboratories Inc., USA) и коммерческие наборы производства R-Biopharm AG (Германия) и Steroglass S.r.l. (Италия) соответственно. При определении пользовались инструкциями производителя, результаты выражали в г/л среды.

Долю переработанной лактозы L_p (%) рассчитывали по формуле:

$$L_p = 100 \times (L_0 - L_{72}) \times L_0^{-1}, \quad (1)$$

где L_0 – начальная концентрация лактозы, г/л; L_{72} – концентрация лактозы в конце ферментации, г/л.

Для расчета эффективности ферментации E_f (%) использовали формулу [12]:

$$E_f = 185,9 \times E_{72} \times (L_0 - L_{72})^{-1}, \quad (2)$$

где 185.9 – коэффициент, учитывающий теоретический максимальный выход при образовании этанола из лактозы (0.538); E_{72} – концентрации этанола через 72 ч ферментации, г/л; L_0 – начальная концентрация лактозы, г/л; L_{72} – концентрация лактозы после 72 ч ферментации, г/л.

Статистическую обработку результатов проводили после исключения нормального распределения в выборках с помощью критерия Пирсона. Выборки представляли в формате медианы и межквартильного интервала – Me ($Q1 \div Q3$). Для внутригрупповых сравнений применяли критерий Краскела–Уоллиса, для сравнения между группами – критерий Манна–Уитни. Различия считали статистически значимыми при $p < 0.05$. Все вычисления проведены

с помощью программного пакета Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США).

Результаты исследования. Культивирование на БПС. Как штамм *K. lactis* Y-2037, так и штамм *K. marxianus* Y-2042 были способны к переработке лактозы сыворотки, и ее концентрация заметно снижалась, начиная с 24-го часа ферментации. В итоге штамм *K. lactis* Y-2037 оказался способным переработать до 90% лактозы, что соответствовало уменьшению ее концентрации в БПС в 9.89 раза ($p < 0.05$). Штамм *K. marxianus* Y-2042 перерабатывал 82.8% лактозы, ее концентрация в БПС уменьшалась в 5.82 раза ($p < 0.05$). Ферментация лактозы в базовой среде сопровождалась образованием этанола, концентрация которого к 24 ч эксперимента превышала 13.0 г/л для штамма *K. lactis*

Y-2037 и 10.0 г/л для *K. marxianus* Y-2042. После 72 ч от начала опыта концентрация этанола превысила для этих штаммов 20.0 и 17.0 г/л, а эффективность ферментации составила 97.8 и 90.8% соответственно (табл. 1).

Эффект изменения рН среды. Умеренное снижение рН (до 4.2) сопровождалось повышением переработки лактозы в 1.22 раза при использовании штамма *K. lactis* Y-2037 и в 1.24 раза – при ферментации штаммом *K. marxianus* Y-2042. Соответственно этому имелась тенденция к увеличению выработки этанола. При снижении рН до 3.9 наблюдали значительное снижение переработки лактозы и пропорциональное этому уменьшение образования этанола. Зависимость от рН была более заметна у *K. marxianus* Y-2042 (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Изменение концентрации лактозы и этанола при культивировании *K. lactis* Y-2037 и *K. marxianus* Y-2042 на базовой питательной среде

Время, ч	Лактоза, г/л		Этанол, г/л	
	<i>K. lactis</i> Y-2037	<i>K. marxianus</i> Y-2042	<i>K. lactis</i> Y-2037	<i>K. marxianus</i> Y-2042
0	42.5 (39.0÷46.2)		0.2 (0.1÷0.4)	
12	25.5 (24.2÷26.3) *	32.8 (29.0÷35.3) *	6.5 (6.0÷7.2) *	4.9 (4.3÷5.4) *#
24	11.2 (10.0÷12.5) *	15.7 (14.1÷17.5) *#	13.7 (12.1÷15.4) *	10.2 (9.2÷11.4) *#
48	7.1 (6.7÷7.9) *	10.9 (9.6÷11.4) *#	18.0 (15.9÷20.3) *	14.5 (13.1÷15.9) *#
72	4.3 (3.9÷4.8) *	7.3 (6.6÷8.1) *#	20.1 (18.5÷21.9) *	17.2 (15.8÷18.4) *#

Примечания: * – обозначает статистически значимые различия с начальными величинами концентраций (0 ч); # – между штаммами *Kluyveromyces*.

Т а б л и ц а 2

Концентрация лактозы и этанола через 72 ч культивирования штаммов *K. lactis* Y-2037 и *K. marxianus* Y-2042 на среде с различным рН

	Лактоза, г/л		Этанол, г/л	
	<i>K. lactis</i> Y-2037	<i>K. marxianus</i> Y-2042	<i>K. lactis</i> Y-2037	<i>K. marxianus</i> Y-2042
	До ферментации – 42.5 (39.0÷46.2) г/л		До ферментации – 0.2 (0.1÷0.4) г/л	
рН				
4.5	4.3 (3.9÷4.8) *	7.3 (6.6÷8.1) *	20.1 (18.5÷21.9) *	17.2 (15.8÷18.4) *
4.2	3.5 (3.1÷3.8) *#	5.9 (5.3÷6.5) *#	20.5 (18.9÷22.2) *	18.0 (16.4÷19.7) *
3.9	9.6 (8.6÷10.7) *#	14.9 (13.6÷16.5) *#	15.6 (14.2÷17.1) *#	12.3 (10.9÷13.4) *#
Ионы марганца, мг/л				
5.0	4.4 (3.9÷4.8) *	7.2 (6.5÷8.0) *#	19.9 (18.3÷21.9) *	17.3 (15.8÷18.6) *
10.0	4.1 (3.7÷4.6) *	6.5 (5.8÷7.1) *#	20.2 (18.4÷22.3) *	17.7 (16.1÷19.4) *#
25.0	3.5 (3.2÷3.9) *	5.2 (4.7÷5.8) *#	20.5 (18.6÷22.7) *#	18.2 (16.9÷20.0) *#
Ионы кобальта, мг/л				
1.0	4.5 (4.0÷4.9) *	7.6 (6.8÷8.3) *#	20.0 (18.4÷21.9) *	16.8 (15.2÷18.5) *
2.0	4.7 (4.3÷5.1) *	7.9 (7.1÷8.8) *#	19.4 (17.7÷21.0) *	16.2 (15.6÷17.9) *#
5.0	11.2 (9.9÷12.4) *	16.1 (14.7÷17.6) *#	13.5 (12.1÷14.8) *#	10.1 (9.2÷11.4) *#

Примечания: * – обозначает статистически значимые различия с начальными величинами концентраций; # – со значениями при культивировании на БПС (табл. 1, 72 ч).

Изменение рН среды до 4.2 не сопровождалось изменением эффективности ферментации (97.7 и 91.4% для изученных штаммов), дальнейшее снижение рН до 3.9 уменьшало величину этого показателя до 88.1% у *K. lactis* Y-2037 и до 82.8% у *K. marxianus* Y-2042 (на 9.7 и 8.0% соответственно).

Эффект добавления ионов марганца. Добавление 5 мг/л ионов марганца в БПС практически не повлияло на количество утилизируемой лактозы и синтезируемого этанола. При концентрации 10 мг/л и, в еще большей степени, 25 мг/л переработка лактозы значительно увеличилась. В результате к 72 ч концентрация лактозы была на 0.8 г/л ниже при использовании штамма Y-2037, и на 2.1 г/л ниже при использовании штамма Y-2042, чем при культивировании дрожжей на БПС. Как результат, процент переработки лактозы штаммами *K. lactis* Y-2037 не изменился, в то время как *K. marxianus* Y-2042 – увеличился на 5.7%. Это не сопровождалось изменением эффективности ферментации. При использовании штамма *K. lactis* Y-2037 величина показателя варьировала в пределах от 97.1 до 97.7%, при использовании штамма *K. marxianus* Y-2042 – в пределах от 90.7 до 91.4%, то есть вблизи значений, полученных при культивировании этих дрожжей на БПС.

Эффект добавления ионов кобальта. Показатели ферментации лактозы штаммами *K. lactis* и *K. marxianus* при добавлении в среду ионов кобальта в концентрациях 1 и 2 мг/л существенно не менялись. Ионы кобальта в концентрации 5 мг/л показали себя токсичными и снижали переработку лактозы этими штаммами в 1.24 и 1.31 раза соответственно. Параллельно, с той же направленностью, но более отчетливо, менялась и продукция биоэтанола. Увеличение концентрации ионов кобальта до 5 г/л значительно ингибировало эффективность ферментации, которая снизилась до 80.1% (в 1.22 раза) для *K. lactis* Y-2037 и до 71.1% (в 1.28 раза) для *K. marxianus* Y-2042, в сравнении с результатами при культивировании на БПС, то есть оба штамма реагировали на добавление ионов кобальта примерно в равной степени.

Обсуждение полученных результатов. Результаты, полученные при ферментации подсырной сыворотки выбранными штаммами

K. lactis и *K. marxianus* показали их высокую способность к переработке лактозы. Они оказались сходными с результатами ранее проведенных исследований с другими штаммами дрожжей [10, 13].

Процесс ферментации подвержен воздействию множества факторов, которые могут существенно влиять на конверсию углеводов в биоэтанол конкретным штаммом дрожжей. Важнейшими из этих факторов являются условия культивирования, такие как температура, рН, аэрация, присутствие в сыворотке различных экотоксикантов, регуляторов роста и метаболизма клеток. Правильный подбор этих параметров может значительно улучшить показатели переработки лактозы подсырной сыворотки [13].

Исследования подтвердили, что мы находимся вблизи оптимума рН для *Kluveromyces*.

В отношении марганца хорошие результаты были получены при его концентрации 25 мг/л. Значительного увеличения утилизации лактозы не следует ожидать при уже достигнутом уровне ее переработки в 90%, но даже снижение конечной концентрации лактозы порядка 1 г/л можно считать заслуживающим внимания. Внутри клетки марганец активно взаимодействует со многими белками, органическими кислотами, что обеспечивает транспорт, окислительно-восстановительные реакции и устойчивость дрожжей к стрессовым воздействиям. Оптимальные концентрации ионов марганца постоянно обсуждаются, по-видимому, для решения отдельных задач требуются разные их величины [14]. В качестве особого момента необходимо более заметное влияние ионов марганца на переработку лактозы штаммом *K. marxianus* Y-2042, что может способствовать его конкуренции со штаммами *K. lactis*, которые на настоящий момент являются лидерами в переработке сыворотки.

Используя ионы кобальта, мы надеялись получить аналогичные результаты при их концентрациях 2 или 5 мг/л. Поддержание оптимального содержания кобальта в клетках микроорганизмов может способствовать росту клеток и обеспечению адекватного метаболизма углеводов в дрожжах [15]. Тем не менее, низкие концентрации кобальта не оказывали влияния на переработку лактозы, а в концентрации 5 мг/л кобальт оказывал заметное угнетающее воздействие на основные показатели биотехнологического процесса. Возможные причины

включают в себя, во-первых, влияние кислого рН, которое значительно замедляет поступление кобальта в дрожжевые клетки. Во-вторых, может сказываться температурный фактор, поскольку известно, что при более высоких температурах транспортные и метаболические эффекты ионов кобальта значительно усиливаются [15].

Дальнейшие перспективы развития данного направления заключаются в отборе природных штаммов-суперпродуцентов, а также подключения методик трансгенеза и геномного редактирования. Эти действия должны быть направлены на повышение активности ключевых ферментов доставки лактозы в клетки и биоконверсии, а также факторов, обеспечивающих устойчивость продуцентов к контаминантам и стрессовым факторам различной природы.

Заключение. При культивировании в среде на основе подсырной сыворотки с контролем скорости перемешивания, аэрации, температуры (34°C) и рН (4.6) штаммы дрожжей *K. lactis* Y-2037 и *K. marxianus* Y-2042 способны в течение 72 ч утилизировать 89.9 и 82.8% лактозы, образуя 20.1 и 17.2 г/л этанола соответственно. Эффективность ферментации в этом процессе составляет 97.8% для *K. lactis* Y-2037, 90.8% – для *K. marxianus* Y-2042.

Снижение рН среды до 4.2 не сопровождается существенными изменениями показателей конверсии, дальнейшее снижение рН до 3.9 уменьшает утилизацию лактозы, эффективность ферментации при использовании *K. lactis* Y-2037 на 9.7%, *K. marxianus* Y-2042 – на 8.0%.

Увеличение концентрации ионов марганца до 10 мг/л и, в особенности, до 25 мг/л сопровождается повышением переработки лактозы и выработки этанола. В последнем случае штаммы дрожжей *K. lactis* Y-2037 и *K. marxianus* Y-2042 способны в течение 72 ч утилизировать 91.8 и 87.8% лактозы, образуя 20.5 и 18.2 г/л этанола соответственно. Эффективность ферментации при этом не меняется.

Ионов кобальта в концентрациях 1 и 2 мг/л не оказывают какого-либо эффекта на ферментацию лактозы штаммами *K. lactis* Y-2037 и *K. marxianus* Y-2042. В концентрации 5 мг/л кобальт существенно снижает переработку лактозы этими штаммами – в 1.24 и 1.31 раза соответственно. Эффективность ферментации при этом снижается в 1.22 раза для *K. lactis* Y-2037 и в 1.28 раза для *K. marxianus* Y-2042.

Штамм *K. lactis* Y-2037 обладает максимальной эффективностью в отношении переработки лактозы подсырной сыворотки, его использование рекомендуется в качестве инструмента для утилизации лактоза-содержащих отходов производства сыра, позволяющего значительно уменьшить объемы загрязнений и получить в качестве вторичного полезного продукта биоэтанол.

Литература

1. Просеков А.Ю. Тенденции развития сыродельной отрасли в России // Сыроделие и маслоделие. 2024. № 4. С. 3–6.
2. Recent advances in whey processing and valorisation: technological and environmental perspectives / D. Buchanan, W. Martindale, E. Romeih, E. Hebishy // International Journal of Dairy Technology. 2023. Vol. 76. P. 291–312. DOI: 10.1111/1471-0307.12935
3. Bioprospecting of microbial strains for biofuel production: metabolic engineering, applications, and challenges / M.F. Adegboye, O.B. Ojuederie, P.M. Talia, O.O. Babalola // Biotechnology for Biofuels. 2021. Vol. 14. № 1. e5. DOI: 10.1186/s13068-020-01853-2
4. Papademas P., Kotsaki P. Technological utilization of whey towards sustainable exploitation // Advances in Dairy Research. 2019. Vol. 7. Iss. 4. e231. DOI: 10.35248/2329-888X.19.7.231
5. Selection and subsequent physiological characterization of industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains during continuous growth at sub- and supra optimal temperatures / K.Y.F. Lip, E. Garcia-Rios, C.E. Costa, J.M. Guillamón, L. J. Domingues, Teixeira, W.M. van Gulik // Biotechnology Reports. 2020. Vol. 26. e00462. DOI: 10.1016/j.btre.2020.e00462
6. Zandona E., Blažić M., Režek Jambrak A. Whey utilization: sustainable uses and environmental approach // Food Technology and Biotechnology. 2021. Vol. 59. № 2. P. 147–161. DOI: 10.17113/ftb.59.02.21.6968
7. Vu H.H., Jin C., Chang J.H. Structural basis for substrate recognition of glucose-6-phosphate dehydrogenase from *Kluyveromyces lactis* // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2021. Iss. 553. P. 85–91. DOI: 10.1016/j.bbrc.2021.02.088
8. Evaluation of *Kluyveromyces* spp. for conversion of lactose in different types of whey from dairy processing waste into ethanol // A.M. Ohstrom, A.E. Buck, X. Du, J. Wee // Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. e1208284. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1208284
9. Влияние внешних факторов на свойства дрожжей *Candida tropicalis* при утилизации спиртовой барды / Н.С. Евдокимов, А.А. Каленчук, В.В. Даньшина, Е.А. Рогачев // Известия Уфимского научного центра РАН. 2023. №3. С. 18–26. DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-3-18-26
10. Evolution of cross-tolerance to metals in yeast / A.L. Bazzicalupo, P.C. Kahn, E. Ao, J. Campbell,

S.P. Otto // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2025. Vol. 122. № 37. e2505337122. DOI: 10.1073/pnas.2505337122

11. Аббас К.С., Новочадов В.В. Биоконверсия лактозы в этанол дрожжами *Kluyveromyces lactis* как этап утилизации подсырной сыворотки // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2025. № 2(75). С. 106–115. DOI: 10.31677/2072-6724-2025-75-2-106-115

12. Koushki M., Jafari M., Azizi M. Comparison of ethanol production from cheese whey permeate by two yeast strains // Journal of Food Science and Technology. 2012. Vol. 49. P. 614–619. DOI: 10.1007/s13197-011-0309-0

13. Tesfaw A. The current trends of bioethanol production from cheese whey using yeasts: biological and economical perspectives // Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 11. e11. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1183035/full

14. Natural variation in yeast reveals multiple paths for acquiring higher stress resistance / A.N. Scholes, T.N. Stuecker, S.E. Hood, C.J. Locke, C.L. Stacy, Q. Zhang, J.A. Lewis // BMC Biology. 2024. Vol. 22. № 1. e149. DOI: 10.1186/s12915-024-01945-7

15. Kosiorek M. Effect of cobalt on the environment and living organisms – A review // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. Vol. 17. № 5. e11449. DOI: 10.15666/aer/1705_1141911449

References

1. Prosekov A.YU. Tendentsii razvitiya syrod-el'noy otrasli v Rossii // Syrodeliye i maslodeliye. 2024, no 4, pp. 3–6.

2. Buchanan D., Martindale W., Romeih E., Hebishy E. Recent advances in whey processing and valorisation: technological and environmental perspectives // International Journal of Dairy Technology. 2023, vol. 76, pp. 291–312. DOI: 10.1111/1471-0307.12935

3. Adegboye M.F., Ojuederie O.B., Talia P.M., Babalola O.O. Bioprospecting of microbial strains for biofuel production: metabolic engineering, applications, and challenges // Biotechnology for Biofuels. 2021, vol. 14, no. 1, e5. DOI: 10.1186/s13068-020-01853-2

4. Papademas P., Kotsaki P. Technological utilization of whey towards sustainable exploitation // Advances in Dairy Research. 2019, vol. 7, iss. 4, 231. DOI: 10.35248/2329-888X.19.7.231

5. Lip K.Y.F., García-Ríos E., Costa C.E., et al. Selection and subsequent physiological characterization of industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains during continuous growth at sub- and supra optimal tempera-

tures // Biotechnology Reports. 2020, vol. 26, 00462. DOI: 10.1016/j.btre.2020.e00462

6. Zandona E., Blažič M., Režek Jambrak A. Whey utilization: sustainable uses and environmental approach // Food Technology and Biotechnology. 2021, vol. 59, no. 2, pp. 147–161. DOI: 10.17113/ftb.59.02.21.6968

7. Vu H.H., Jin C., Chang J.H. Structural basis for substrate recognition of glucose-6-phosphate dehydrogenase from *Kluyveromyces lactis* // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2021, iss. 553, pp. 85–91. DOI: 10.1016/j.bbrc.2021.02.088

8. Ohstrom A.M., Buck A.E., Du X., Wee J. Evaluation of *Kluyveromyces* spp. for conversion of lactose in different types of whey from dairy processing waste into ethanol // Frontiers in Microbiology. 2023, vol. 14, 1208284. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1208284

9. Evdokimov N.S., Kalenchuk A.A., Dan'shina, Rogachev E.A. Vliyanie vnesnikh faktorov na svojstva drozhzhey *Candida tropicalis* pri utilizatsii spirtovoy bardy // Izvestiya Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2023, no. 3, pp. 18–26. DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-3-18-26

10. Bazzicalupo A.L., Kahn P.C., Ao E., et al. Evolution of cross-tolerance to metals in yeast // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2025, vol. 122, no. 37, 2505337122. DOI: 10.1073/pnas.2505337122

11. Abbas K.S., Novochadov V.V. Biokonversiya laktozy v etanol drozhzhami *Kluyveromyces lactis* kak etap utilizatsii podsyрной sыворотки // Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2025, no. 2(75), pp. 106–115. DOI: 10.31677/2072-6724-2025-75-2-106-115

12. Koushki M., Jafari M., Azizi M. Comparison of ethanol production from cheese whey permeate by two yeast strains // Journal of Food Science and Technology. 2012, vol. 49, pp. 614–619. DOI: 10.1007/s13197-011-0309-0

13. Tesfaw A. The current trends of bioethanol production from cheese whey using yeasts: biological and economical perspectives // Frontiers in Energy Research. 2023, vol. 11, e11. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1183035/full

14. Scholes A.N., Stuecker T.N., Hood S.E., et al. Natural variation in yeast reveals multiple paths for acquiring higher stress resistance // BMC Biology. 2024, vol. 22, no. 1, 149. DOI: 10.1186/s12915-024-01945-7

15. Kosiorek M. Effect of cobalt on the environment and living organisms – A review // Applied Ecology and Environmental Research. 2019, vol. 17, no. 5, 11449. DOI: 10.15666/aer/1705_1141911449



**COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF *KLUYVEROMYCES LACTIS*
AND *KLUYVEROMYCES MARXIANUS* ABILITY TO FERMENT CHEESE WHEY
INTO ETHANOL**

© **K.S. Abbas, V.V. Novochadov**

Volgograd State University,
100, prospect Universitetskij, 400062, Volgograd, Russian Federation

The purpose of this study was to find out the features of the lactose conversion into ethanol by yeast *Kluyveromyces lactis* and *Kluyveromyces marxianus* in cheese whey as a variant of environmental biotechnology under conditions of changes in the composition and properties of the culture medium. To assess the differences related to the composition and properties, we changed the pH and concentration of manganese or cobalt ions in cheese whey. The main characteristics of the process were the percentage of lactose processing, ethanol production, and fermentation efficiency during 72 hours of cultivation.

As a result, *K. lactis* Y-2037 strain decreased lactose concentration by 9.89 times within 72 hours, *K. marxianus* Y-2042 strain decreased it by 5.82 times. The ethanol concentration in the final medium was 20.0 g/l and 17.0 g/l, and the fermentation efficiency was 97.8% and 90.8%, respectively. A decrease in the pH of the medium to 4.2 was not accompanied by significant changes in the parameters of the biotechnological process, a further decrease in the pH to 3.9 reduced the utilization of lactose, the fermentation efficiency of *K. lactis* Y-2037 and *K. marxianus* Y-2042 decreased by 9.7% and 8.0%, respectively. An increase in the concentration of manganese ions to 25 mg/l leads to the fact that *K. lactis* Y-2037 and *K. marxianus* Y-2042 strains utilized 91.8% and 87.8% of lactose, forming 20.5 g/l and 18.2 g/l of ethanol, respectively. The fermentation efficiency did not change. Cobalt ions at concentrations of 1 mg/l and 2 mg/l had no effect, and cobalt ions at concentrations of 5 mg/l reduced lactose processing by the *K. lactis* Y-2037 strain by 1.24 times and *K. marxianus* Y-2042 by 1.31 times. The fermentation efficiency decreased by 1.22 times and 1.28 times, respectively.

The technology of processing lactose-containing dairy industry waste by converting lactose into ethanol with *K. lactis* and *K. marxianus* yeast cultures has been proposed to be used for reducing contamination and, if necessary, for producing bioethanol internally.

Keywords: cheese whey, lactose, fermentation, bioethanol, *Kluyveromyces lactis*, *Kluyveromyces marxianus*.