

Введение Переработка спиртовой барды является энергозатратным процессом вследствие низкой энергетической эффективности процесса сушки [1, 2]. С целью снижения затрат энергии в расчете на единицу кормового белка, барда подвергается переработке с использованием различных штаммов кормовых дрожжей. В последнее время все чаще используются штаммы, вырабатывающие витамины и другие ценные компоненты кормов. Однако, при таком подходе невозможно кардинально улучшить показатели процесса, поскольку в барде содержится не более 8 - 10 % сухих веществ, из которых только часть может являться субстратом для питания дрожжей. Ранее был предложен метод обогащения барды сахарами за счет добавки зернового сусла [3 - 5]. Однако, количественных оценок энергоэффективности такого процесса получено не было. Настоящая работа посвящена экспериментальной оценке энергетических затрат на транспорт кислорода в процессе роста кормовых дрожжей на обогащенной барде. Экспериментальная установка В установке использован биореактор разборной конструкции, позволяющий устанавливать различные типы мешалок с цанговыми зажимами. Геометрический объем аппарата составлял 6 л. Коэффициент заполнения биореактора - 0,5. Внутренний диаметр аппарата - 150 мм. В процессе использована двухъярусная дисковая мешалка с перфорированными отогнутыми сегментами [6]. Диаметр мешалки 100 мм. Угол наклона рабочих поверхностей к горизонтальной плоскости составляет 35°. Площадь отогнутых секторов составляет 53,8 см². Отверстия перфорации конические, с наименьшим диаметром 3 мм и углом конусности 90 градусов. Расстояние от нижнего яруса мешалки до днища биореактора составляет половину диаметра мешалки, а между ярусами равно диаметру мешалки. В реакторе установлены 4 отражательные перегородки, имеющие суммарную поверхность 25% от площади вертикального сечения рабочего объема аппарата [7]. Термостабилизация культуральной жидкости обеспечивалась подачей воды заданной температуры в рубашку аппарата из ультратермостата mlw U8. Подача стерильных жидких компонентов и титрующего агента в биореактор осуществлялась перистальтическими насосами из емкостей, установленных на электронных весах типа МК-6.2-A21, погрешность измерения массы составляет ± 6 г. В качестве пеногасителя применялся пропиол Б400. Подача воздуха на аэрацию осуществлялась компрессором УК40-2М через ротаметр РСЗ и стерилизующий фильтр. Отработанный газ поступал на барабанный газовый счетчик Р7000. Часть газового потока отводилась в ячейку с установленным датчиком концентрации кислорода Oxygen sensor KE-25 и затем возвращалась в линию сброса газа. При этом избыточное давление в ячейке изменялось в ходе всего процесса незначительно (от 4 до 8 см водяного столба по U-образному манометру). В режиме on-line замерялась кислотность культуральной жидкости, ее температура и концентрация растворенного кислорода с использованием анализатора Мультитест ИПЛ-513. В отбираемых пробах определялось

содержание РВ [8] и биомассы (по оптической плотности) с использованием фотоэлектроколориметра КФК-3-«30МЗ». Обработка информации велась в среде табличного процессора Excel®. Питательная среда С целью корректного измерения оптической плотности культуральной жидкости в экспериментах для приготовления сред использованы фильтраты спиртовой барды и зернового сусла, полученные с Мамадышского спиртзавода. Фильтрация барды и сусла осуществлялась через полотняную ткань. Наличия визуально определяемых взвесей не допускалось. Состав питательных сред приведен в табл. 1. Таблица 1 - Состав питательных сред

Компоненты среды	Содержание, г/л
Минеральная среда Ридера - среда для качалочных колб	Глюкоза 20 (NH ₄) ₂ SO ₄ 3 MgSO ₄ *7H ₂ O 0,7 NaCl 0,5 KН ₂ РO ₄ 1,0 K ₂ НРO ₄ 0,1 Са(NO ₃) ₂ 0,4 Дрожжевой автолизат 10
Исходная питательная среда («подушка»)	Минеральный состав аналогичен Фильтрат сусла 20%РВ 200 Фильтрат спиртовой барды остальное
Подпиточная среда	Минеральный состав аналогичен Фильтрат сусла 500 Фильтрат спиртовой барды остальное

Результаты и их обсуждение Режимные параметры процесса культивирования дрожжей в биореакторе приведены в табл. 2. Таблица 2 - Параметры процесса культивирования дрожжей

t	VL	n	VG	pO ₂	O ₂	Vn
0	3,26	298	0,67	6,72	20,88	4
3,22	400	0,66	3,45	19,66	6	3,22
500	0,59	1,49	17,53	7	3,22	800
0,67	2,81	16,63	8	3,17	1200	0,66
0,61	12,87	9	3,17	1500	0,99	3,28
15,67	10	3,11	1500	0,99	4,16	16,65
11	3,11	1500	0,97	4,38	16,93	12
3,11	1500	0,91	4,76	17,27	13	3,28
1500	0,91	4,58	16,91	0,23	14	3,28
1500	0,96	4,33	16,34	15	3,22	1500
0,94	5,08	17,48	16	3,21	1200	0,96
5,75	18,69	0,24	17	3,21	1000	0,97
2,29	16,24	18	3,15	1000	0,98	5,29
18,70	19	3,15	500	1,02	2,95	19,12
20	3,15	500	1,00	3,76	19,35	21
3,08	450	1,02	2,60	19,49	22	3,08
450	1,03	2,41	19,43	23	3,01	450
1,33	2,86	19,61	24	3,18	1500	1,39
4,03	16,66	0,46	25	3,18	1500	1,32
6,48	19,07	26	3,12	1200	1,29	6,19
19,31	27	3,12	1200	1,32	5,31	18,41
0,68	27,5	3,12	1200	1,35	2,80	16,26
28	3,12	1200	1,36	2,68	15,89	29
3,12	1000	1,71	1,90	16,96	1,24	30
3,33	1200	1,61	1,60	16,28	31	3,33
1800	1,60	5,09	17,63	32	3,33	1800
1,62	6,43	19,12	33	3,27	800	1,63
4,28	19,33	34	3,21	800	1,63	4,36
19,42	В таблице 3 приняты следующие обозначения: t - время процесса, час; VL - объем культуральной жидкости, изменяемый при отборе проб и операциях долива среды, л; n - скорость вращения мешалки, об/мин; VG - удельный расход воздуха, подаваемого на аэрацию, л/л•мин; pO ₂ - концентрация растворенного кислорода, мг/л; O ₂ - концентрация кислорода в отработанном газовом потоке, % об.; Vn - подпитка, л. Процесс проводили при ручном переключении скорости вращения мешалки и расхода воздуха с целью поддержания не лимитирующего уровня концентрации кислорода в культуральной жидкости. Кроме указанных в таблице параметров замерялись температуры культуральной жидкости и газовых потоков, расход газа на выходе из биореактора, мощность, рассеиваемая мешалкой. Скорость потребления кислорода рассчитывалась по газовому балансу [9]. Объемный коэффициент массопередачи кислорода рассчитывался как частное от деления скорости					

потребления кислорода на движущую силу процесса массопередачи. Последняя определялась исходя из усредненного значения равновесной концентрации кислорода в жидкой фазе, равной 6,8 мг/л и текущих замеров pO_2 . Результаты эксперимента представлены на рисунках 1 - 3. На рисунках представлены зависимости, полученные для различных средних величин аэрации, приведенных к нормальным условиям: от 0,684 до 1,167 нл/л•мин. Рис. 1 - Зависимости энергоэффективности процесса массопереноса кислорода от скорости вращения мешалки при варьировании аэрации Рис. 2 - Зависимости скорости потребления кислорода от скорости вращения мешалки при варьировании аэрации Стрелкой на рисунке 3 показано направление возрастания величины аэрации. Рис. 3 - Зависимость объемного коэффициента массопередачи кислорода от мощности мешалки при варьировании аэрации Разброс расчетных значений величины KLa связан с изменением потребности популяции дрожжей в кислороде при смене соотношения концентраций субстрата и кислорода в культуральной жидкости, а также при изменении интенсивности пенообразования. Поэтому вместо трендов частных зависимостей на рисунке 3 приведены лишь огибающие кривые, показывающие диапазон изменения KLa . Динамика изменения оптической плотности культуральной жидкости и концентрации в ней редуцирующих веществ типична для периодического процесса (рис. 4). Рис. 4 - Рост биомассы и потребление субстрата в процессе культивирования дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* ВКПМ У-3158 Выводы Для дисковой многоярусной мешалки оптимальная скорость вращения, обеспечивающая достаточно высокую энергетическую эффективность процесса массопередачи кислорода (более 0,5 г O_2 /вт•ч) не может превышать 1000 об/мин. При этом интенсивность аэрации не должна быть менее 1,2 л/л•мин. Нужно отметить явно выраженную зависимость энергоэффективности от величины удельной аэрации. При отсутствии лимитирования роста дрожжей концентрациями компонентов культуральной жидкости, периодический процесс роста завершается в течение 6 - 7 часов. При этом достигается удельная скорость роста 0,4 час⁻¹. В дальнейшем рост резко замедлился, несмотря на осуществляемую неоднократную подпитку средой. Очевидно, что минеральный или витаминный состав среды оказался недостаточным по отношению к количеству вносимого субстрата, что требует проведения отдельной работы по его оптимизации. Это тем более актуально, что многоярусные дисковые перемешивающие устройства могут обеспечить транспорт кислорода с необходимой скоростью при существенно больших концентрациях биомассы и, следовательно, при более высоких продуктивностях биореактора.