

Введение Эффективность перфорированных мешалок по отношению к открытым турбинным мешалкам исследовалась ранее применительно к процессу транспорта кислорода [1 - 4]. Однако, до настоящего времени не определен ряд зависимостей, характеризующих многоярусные мешалки дискового типа с наклонными рабочими поверхностями, в частности, изменение массообменных характеристик в зависимости от угла наклона конструктивных элементов и величины удельной аэрации. Целью работы являлось частичное восполнение этого пробела на основе исследования лабораторных моделей биореактора с экспериментальными мешалками. Определение зависимостей мощностных характеристик, а также энергоэффективности перфорированных мешалок, имеет решающее значение при конструировании биореакторов интенсивного действия, позволяющих проводить процессы с «плотными культурами» при высоких концентрациях микробной биомассы (80 и более г/л). При таких концентрациях микроорганизмов в биореакторе образуется достаточно устойчивая пена, параметры которой в свою очередь определяются режимами аэрации и перемешивания. Конструкция аппарата Аппарат (биореактор) разборной конструкции позволяет устанавливать различные типы мешалок с цанговыми зажимами. Геометрический объем аппарата составляет 6 - 9 л в зависимости от типа и количества устанавливаемых царг. Конструкция аппарата и средств измерения описана ранее [4]. Исследовались одно- и многоярусные мешалки ряда конструкций [4]. Это диски с отогнутыми секторами, гофрированный диск и турбинная шестилопастная мешалка с противоположно наклоненными смежными лопастями. Геометрические характеристики ярусов мешалок равны: 1) диск с двумя отогнутыми секторами – диаметр 100 мм, угол наклона секторов к горизонтальной плоскости (β) 10, 17, 35 и 55 градусов, площадь отогнутых секторов 53,8 см²; 2) гофрированный диск – диаметр 100 мм, $\beta = 20$ градусов, площадь секторов 64,4 см²; 3) турбина с наклонными лопастями – диаметр 95 мм, $\beta = 60$ градусов, площадь лопастей 46,2 см². Рабочие поверхности мешалок перфорированы. Отверстия перфорации конические, с наименьшим диаметром 3 мм и углом конусности 90 градусов. Геометрические параметры исследованных вариантов конструкции мешалок равны: №1 – диск, $\beta = 17$ градусов, $L/d = 1$; №2 – диск, $\beta = 35$ градусов, $L/d = 1$; №3 – диск, $\beta = 55$ градусов, $L/d = 1$; №4 – диск гофрированный, $\beta = 20$ градусов, $L/d = 1$; №5 – турбина, $\beta = 60$ градусов, $L/d = 1$; №6 – 2 диска, $\beta = 35$ и 35 градусов, $L/d = 0,5$; $\Delta L/d = 0,5$; №7 – 2 диска, $\beta = 35$ и 35 градусов, $L/d = 0,5$; $\Delta L/d = 1$; №8 – 3 диска, $\beta = 35$, 35 и 17 градусов, $L/d = 0,5$; $\Delta L/d = 0,5$; №9 – 3 диска, $\beta = 10$, 10 и 10 градусов, $L/d = 0,5$; $\Delta L/d = 0,5$; №10 – 2 диска, $\beta = 10$ и 10 градусов, $L/d = 0,5$; $\Delta L/d = 1$. Здесь L/d – отношение расстояния от днища аппарата до нижнего яруса мешалки к диаметру мешалки; $\Delta L/d$ – отношение расстояния между ярусами к диаметру мешалки. Все эксперименты проведены на одном реакторе геометрического объема 6 л с вертикально установленным валом

перемешивающего устройства и нижним приводом. В реакторе установлены 4 отражающие перегородки. Высота столба жидкости равна диаметру реактора. Результаты и их обсуждение В качестве модельной среды в проведенных экспериментах использовался раствор сульфита натрия в дистиллированной воде с концентрацией 37,5 г/л. В качестве катализатора реакции окисления использовался сульфат кобальта. В таблице 1 представлены условия проведения экспериментов по измерению массообменных параметров лабораторного биореактора с использованием сульфитной методики. Во всех экспериментах объем жидкой фазы был постоянен и равен 3 л, концентрация сульфита натрия – 37,5 г/л. Таблица 1 – Физико-химические факторы, определяющие условия экспериментов № K TL TG P Свых CO2G pO2 1 31,0 27,0 755 11,65 15,84 6,40 2 30,8 27,5 762 10,23 15,00 6,10 3 31,0 27,0 762 9,67 14,59 6,02 4 31,0 27,3 758 10,97 15,36 5,99 5 30,7 27,0 744 10,00 14,82 7,20 1 24,5 26,0 770 13,77 17,14 6,68 2 25,4 27,0 770 14,83 17,77 6,66 3 26,5 27,0 770 14,82 17,72 6,65 4 27,1 28,0 770 14,33 17,44 6,52 5 23,4 26,0 772 13,97 17,23 6,64 1 31,9 27,0 755 14,85 17,66 6,45 2 31,8 27,5 755 15,84 18,35 6,48 3 31,4 27,5 755 15,76 18,20 6,54 4 31,6 28,0 755 14,40 17,48 6,41 6 30,6 28,0 744 10,68 15,26 7,22 7 28,8 27,0 744 11,04 15,46 7,30 6 21,3 27,0 772 14,24 17,35 6,61 7 20,9 27,0 772 14,25 17,40 6,50 6 31,3 28,0 735 16,59 18,64 7,30 7 31,6 27,5 735 16,02 18,37 7,40 8 28,6 27,0 754 17,07 18,95 7,41 8 30,5 26,5 754 11,18 15,59 7,42 8 32,3 27,0 754 8,45 13,77 7,41 8 28,8 28,0 767 18,93 19,93 7,23 8 31,5 27,0 767 14,56 17,56 7,22 8 33,1 27,0 767 11,60 15,83 7,18 8 28,7 27,0 767 19,51 20,20 6,84 8 30,3 27,0 767 17,26 19,06 6,94 9 31,5 28,0 761 14,48 17,52 6,53 10 31,6 28,0 761 13,75 17,11 6,45 В таблице 1 обозначены: №/K – номер конструкции мешалки; TL – температура жидкости, °C; TG – температура газа, °C; P – давление под крышкой аппарата, мм.рт.ст; Свых – концентрация кислорода в газовом потоке на выходе из аппарата, % об.; CO2G – средняя концентрация кислорода в газовой фазе, полученная на основе решения дифференциального уравнения массопередачи, % об. (для условия одинаковой продолжительности пребывания пузырьков газа в газо-жидкостной среде); pO2 – концентрация кислорода в сульфитном растворе после завершения процесса окисления сульфита натрия (равновесная с газовой фазой), мг/л. Мощностные характеристики мешалок и параметры процесса массообмена кислорода определялись для каждого значения удельной интенсивности аэрации и скорости вращения и представлялись в табличной форме. На основе газового баланса [5] рассчитывались значения удельной скорости абсорбции кислорода сульфитным раствором (сульфитное число), коэффициента массопередачи кислорода по формуле (1) и эффективности использования энергии, как отношения сульфитного числа к затраченной мощности на перемешивание и аэрацию. В таблице 2 представлен результат такого расчета в среде Excel®. Таблица 2 – Эффективность массообмена кислорода в процессах хеморсорбции сульфитом натрия № K n VGO N + NG VL RO KLa EO 1 31,17 0,920 24,78 8,5 1757

0,34 2 30,00 0,890 23,68 8,7 1990 0,37 3 27,83 0,915 24,51 9,8 2339 0,40 4 22,17
0,903 26,43 8,6 1968 0,33 5 26,67 0,889 26,43 9,3 1831 0,35 1 33,33 2,040 21,94
14,3 2612 0,65 2 32,33 1,970 21,18 12,0 2126 0,57 3 29,17 1,819 23,03 10,9 1940
0,47 4 24,50 1,815 25,15 12,1 2223 0,48 5 28,33 1,828 23,28 13,3 2441 0,57 1 34,17
2,676 22,09 15,5 2861 0,70 2 34,17 2,699 21,81 14,2 2509 0,65 3 31,17 2,733 23,77
14,3 2512 0,60 4 27,17 2,697 27,24 17,4 3252 0,64 6 24,00 0,881 25,56 8,5 1619 0,33
7 26,67 0,892 24,92 8,9 1646 0,36 6 27,75 1,813 23,04 11,9 2169 0,51 7 26,83 1,816
23,92 11,8 2190 0,49 6 25,00 2,625 24,49 11,1 1713 0,45 7 27,50 2,606 23,96 12,1
1872 0,51 8 11,67 0,892 5,71 3,4 502 0,59 8 20,00 0,891 20,14 8,5 1533 0,42 8 28,33
0,885 44,40 10,5 2153 0,24 8 11,67 1,814 5,45 3,5 508 0,64 8 20,00 1,818 18,60 11,7
1927 0,63 8 28,33 1,803 42,36 16,1 2966 0,38 8 11,67 2,904 4,92 4,4 661 0,89 8
20,00 2,870 17,94 10,8 1707 0,60 9 26,17 1,825 25,99 11,8 2154 0,45 10 27,92 1,818
25,20 12,4 2349 0,49

В таблице 2 обозначены: №/К – номер конструкции мешалки
2; n – скорость вращения мешалки, с-1; VGO – величина удельной аэрации,
приведенная к нормальным условиям, мин-1; N, NG – мощности, вводимые в
жидкость мешалкой и газовой фазой соответственно, Вт/л; VL – объем жидкой
фазы в аппарате (3 л); RO – сульфитное число, г/л·час; KLa – коэффициент
массопередачи кислорода, час-1, EO – эффективность процесса абсорбции
кислорода, г O₂/Вт·ч. Расчет величины N осуществлялся по методике,
изложенной ранее [4], а величины NG по формуле [6]: $NG = K \cdot VGO \cdot P_{вх} \cdot$
 $[(P_{вх}/P_{вых})K - 1]$, (1) где P_{вх} и P_{вых} – давления воздуха на входе и выходе из
аппарата, K – безразмерная функция от показателя адиабаты, равная 3,5 [6].
Расчет объемного коэффициента массопередачи кислорода осуществлялся по
формуле: $KLa = RO / C^*O = RO / (C^* \cdot CO_{2G} / 20,95)$, (2) где C* – равновесная с
воздухом концентрация кислорода в жидкой фазе, г/л; CO_{2G} – средняя
концентрация кислорода в дисперсной газовой фазе, % объемный; 20,95 –
концентрация кислорода в воздухе в объемных процентах, при которой
определялись значения C*. Для расчета равновесной концентрации кислорода в
жидкой фазе при средней температуре процесса использовались значения
CO_{2G}. Поскольку интенсивность теплопродукции химической сорбции кислорода
высока, система термостабилизации аппарата не в состоянии полностью
скорректировать резкие отклонения температуры, влияющие на величину
растворимости кислорода. С учетом ошибки измерения концентрации кислорода,
погрешность определения величины объемного коэффициента массопередачи
довольно значительна, что требует определенной повторности экспериментов.
Эффективность расхода энергии на массоперенос кислорода равна отношению:
 $EO = RO \cdot VL / (N + NG)$. (3) С целью проверки адекватности известных формул [6
- 9], предлагаемых для расчета величины KLa, был проведен анализ
взаимозависимостей отдельных параметров процесса массопередачи кислорода
в логарифмических координатах. На основе данных таблицы 3 была выполнена
параметрическая идентификация известных зависимостей объемного

коэффициента массопередачи от режимных параметров и числа ярусов мешалки: $KLa = 3,1 \cdot (35,8 + m) \cdot (W/VL)^{0,88} \cdot (VG/VL)^{0,37}$. (4)

$KLa = 213 \cdot (W/VL)^{0,52} \cdot n^{0,22} / m^{0,23}$, (5) где $W = N + NG$. Показатели степени в формуле (5) практически совпали с приведенными значениями в руководящем документе [6], кроме показателя при числе ярусов мешалки. Средняя погрешность определения KLa по формуле (4) составила 19%, а по формуле (5) – 15,8 %. Таким образом, известные зависимости не отличаются высокой точностью аппроксимации. Поэтому была предпринята попытка включения в выражение для объемного коэффициента массопередачи кислорода всех значимых факторов: $KLa = 1,81 \cdot k \cdot (W/VL)^{0,87} \cdot (VG/VL)^{0,34} \cdot n^{0,2}$, (6) где $k = (34,9 + m^{0,28}) / m^{0,28}$. При использовании данной формулы погрешность аппроксимации объемного коэффициента массопередачи составила 12,9 %, что приемлемо с учетом обобщения результатов испытаний мешалок разных конструкций. Частные зависимости в логарифмических координатах подтверждают адекватность выражения (6). В качестве примера приведена зависимость $LN(KLV)$ от $LN((W/VL))$, где $KLV = KLa / (1,81 \cdot k \cdot (VG/VL)^{0,34} \cdot n^{0,2})$, (рис.1). Этот график иллюстрирует суммарную погрешность всех измерений и примененных методов обработки информации. Из конструктивных параметров на процесс массопереноса кислорода заметное влияние оказывает величина угла наклона рабочей поверхности мешалок (рис. 2). При малом расходе газа увеличение угла наклона рабочей поверхности свыше 35 градусов приводит к росту величины объемного коэффициента массопередачи кислорода. Такой же характер зависимости характерен и для мешалок с меньшим углом наклона рабочей поверхности при аэрации 3 л/л•мин. Рис. 1 – Линейная аппроксимация частного показателя массопередачи кислорода KLV от вводимой мощности в логарифмических координатах. При аэрации 2 – 3 л/л•мин величина KLa практически не зависит от угла наклона рабочей поверхности в диапазоне от 30 градусов и выше. Очевидно, при высоком газосодержании изменением конструкции мешалки не возможно повысить показатели массообмена при фиксированной величине мощности, затрачиваемой на перемешивание газожидкой среды (зависимости, представленные на рисунке 2, получены при примерно равных мощностях, вводимых в жидкость мешалками). Рис. 2 – Зависимость объемного коэффициента массопередачи кислорода от угла наклона поверхностей одноярусных мешалок. Энергетическая эффективность процесса абсорбции кислорода зависит от угла наклона лопастей (секторов) одноярусных мешалок всех исследованных конструкций №1 - №5 при удельной аэрации, превышающей 1 л/л•мин (рис.3). Рис. 3 – Зависимость энергетической эффективности массопередачи кислорода от угла наклона поверхностей одноярусных мешалок. Такой характер зависимостей (рис.3) может быть объяснен возникновением пенного режима при интенсивной аэрации. Для всех уровней аэрации зависимости эффективности массопередачи кислорода от угла

наклона поверхностей мешалок практически линейны. Как следует из зависимостей (рис.3), полученных при примерно равных значениях мощности, вводимой мешалкой в жидкость, наиболее эффективны конструкции с меньшим углом наклона рабочей поверхности. При меньших углах наклона рабочих поверхностей мешалок одинаковая мощность достигается при больших скоростях вращения, что, по-видимому, приводит к образованию большего количества пузырьков меньшего размера и, таким образом, к росту удельной поверхности раздела фаз. Это заключение подтверждается известными данными [8]. В частности, известно, что максимальный диаметр образующихся пузырьков газа пропорционален величине поверхностного натяжения и обратно пропорционален динамическому давлению [8], которое возрастает с увеличением скорости вращения мешалки. Зависимость величины энергетической эффективности массопередачи кислорода от удельной аэрации не линейна (рис. 4). Рис. 4 – Зависимость эффективности массопередачи кислорода от удельной аэрации для многоярусных мешалок. Приращение величины эффективности межфазного переноса кислорода снижается при увеличении скорости вращения мешалки. При этом эффективность массопереноса кислорода с увеличением удельной аэрации выше 3 л/л·мин стремится к предельному значению. Эта закономерность нарушается лишь при скорости вращения мешалки 1700 об/мин и выше, при которой, вследствие образования воронки, происходит дополнительный подсос воздуха. Аналогичная представленной на рисунке 3, зависимость для одноярусной дисковой мешалки линейна в диапазоне удельных скоростей аэрации 1–3 л/л·мин. Однако, для реализации интенсивных режимов культивирования микроорганизмов при высоких концентрациях биомассы, одноярусные мешалки не пригодны по причине локального ввода в жидкую фазу недостаточной мощности. Выводы. На величину эффективности процесса массопередачи кислорода заметное влияние оказывает угол наклона рабочей поверхности яруса мешалки. При интенсивной аэрации и высоких удельных мощностях, вводимых в жидкость перемешивающим устройством, с увеличением угла наклона рабочей поверхности эффективность массопередачи кислорода снижается. Этот эффект несколько нивелируется при более равномерном вводе энергии (установка дополнительных ярусов мешалки). Для биологических реакторов, таким образом, можно рекомендовать использование многоярусных мешалок (3 и более ярусов) с малым углом наклона рабочей поверхности (17 градусов и ниже). При указанных конструктивных параметрах оптимум по эффективности использования энергии будет достигнут при удельной аэрации около 2,0 л/л·мин.