

С целью увеличения интенсивности массопереноса кислорода при использовании мембранного устройства газового питания необходимо предельно увеличить удельную поверхность мембран и обеспечить перпендикулярность движения потока, омывающего трубчатые мембраны, к их поверхности. Этим условиям отвечает разработанная конструкция инокулятора со спиральным движением жидкости. Инокулятор состоит из корпуса, встроенного теплообменника типа «труба в трубе», винтовой перфорированной вставки, через отверстия которой пропущены трубчатые мембраны. Мембраны расположены по пяти концентрическим окружностям. Наличие вставки обеспечивает дополнительную прочность мембран за счёт их внешнего «армирования». Это позволяет увеличить рабочее давление и, тем самым, движущую силу массопереноса кислорода. Схематическое изображение аппарата приведено на рис. 1 [1].

Рис. 1 - Конструкция инокулятора Аппарат (рис.1) содержит цилиндрический корпус 1 с днищем 2, съёмную крышку 3, на которой смонтированы газопроницаемые полимерные трубчатые мембраны 4, установленные вдоль оси корпуса. Кислород поступает в полости цилиндрических мембран через устройство газораспределения 5. Съёмная крышка 3 имеет полость 6 для приема не потребленного кислорода, для сброса которого служит штуцер 7. Этот же штуцер используется для первоначального продува полости мембран перед запуском инокулятора. Засев культуры производится через штуцер 11. Газовое питание поступает через штуцер 9. Продуцируемый углекислый газ отводится через штуцер 10. Через штуцер 8 отбирается культуральная жидкость и внешним рециркуляционным насосом возвращается в аппарат через штуцер 11. Вдоль оси корпуса аппарата 1 установлена труба теплообменника 12, внутри которой расположена труба подвода газа 13, соединенная с газораспределительным устройством 5. Для подачи и отвода теплоносителя используются штуцеры 14 и 15 соответственно. Снаружи трубы теплообменника расположена винтовая перфорированная вставка 16, через отверстия которой проходят трубчатые мембраны 4. Мембраны крепятся на штуцерах, закрепленные в крышке 3 и на корпусе газораспределительного устройства 5. Отверстия в винтовой вставке 16 для облегчения монтажа мембран превышают диаметр последних на 0,1 – 0,2 мм. Кромка винтовой вставки герметизируется уплотнительным шнуром 17. Отбор проб жидкости осуществляется через штуцер 8. Для подачи титранта используется несколько штуцеров 18 расположенных вдоль корпуса 1.

Технические характеристики инокулятора: рабочий объем жидкости – 4,8 л; удельная поверхность мембран - 125 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>; максимальное избыточное давление в полости мембран – 0,31 Мпа; объем газовой полости мембран – 230 мл; внешний диаметр трубчатых мембран - 4 мм, толщина стенки мембран – 1 мм, мембраны – силиконовая трубка. Однако, гидродинамика такого аппарата усложняется по сравнению с аппаратом, в котором мембраны расположены

свободным пучком вдоль оси корпуса, совпадающим с направлением движения жидкости [2-4]. Исследование гидродинамики потока в данном аппарате осуществлено путем получения экспериментальных зависимостей изменения во времени проводимости среды. Импульсная функция возмущения смоделирована путем импульсного ввода в поток дистиллированной воды раствора хлористого натрия. Схема обвязки аппарата при реализации эксперимента приведена на рис.2. Входной поток в исследуемый аппарат Р-1 вводился снизу, температура потока стабилизировалась на уровне  $30 \pm 0,3$  °С с помощью ультратермостата Т-1, избыточное давление в трубчатой мембране контролировалось по манометру PI и варьировалось в диапазоне 0 – 0,3 МПа. Кислород поступал из баллона Б-1.

Рис. 2 - Схема обвязки аппарата

Выходной сигнал получен с помощью кондуктометра, датчик которого был помещен в ячейку У-1. Трассер вводился в количестве 0,375 г NaCl, растворенном в 2,5 мл воды. Кривые безразмерной функции распределения времени пребывания потока получены при избыточном давлении кислорода в полости мембран – 0,29 МПа. В зависимости от заданного удельного расхода входного жидкостного потока, изменяемого в диапазоне от 1 до 1,5 л/л.час, начало отклика (не нулевой выходной сигнал кондуктометра) наблюдалось через 11 – 13 минут после внесения трассера. Продолжительность вымывания трассера составляла 2 – 2,6 часа. Приведенная погрешность воспроизводимости экспериментов составляла 8 – 11 % и определялась нестабильностью расхода жидкости, подаваемой перистальтическим насосом. Поэтому было проведено усреднение по 5 замерам. Вид безразмерной дифференциальной функции распределения времени пребывания частиц потока в аппарате показан на рис. 3 и соответствует диффузионной модели. При высоких скоростях потока (кривая 1: 1,5 л/л.час) наблюдается четко выраженный изгиб на графике отклика. Это свидетельствует о том, что существуют два взаимодействующих потока, описываемых диффузионной моделью, – вдоль внешней стенки аппарата и вдоль стенки встроенного теплообменника. При снижении скорости протока (кривая 2: 1,0 л/л.час) полученная зависимость все в большей степени приближается к классической дифференциальной функции распределения однопараметрической диффузионной модели [5].

Рис. 3 - Дифференциальные функции распределения времен пребывания потока в аппарате

Это свидетельствует о наличии диффузии между параллельными струями жидкости, проявляющейся тем в большей мере, чем больше среднее время пребывания потока в аппарате. Учитывая характер полученной дифференциальной функции распределения времени пребывания потока в инокуляторе, в качестве гидродинамики потока для исследованного аппарата может быть предложена модель струйного течения с дополнительным переносом вещества в радиальном направлении. Выводы: 1) прохождение потока через пучок трубчатых мембран приводит к разделению его на отдельные струи, движущиеся по траекториям различной длины вдоль

внутренних поверхностей аппарата; 2) вклад молекулярной диффузии и собственно перемешивания в формирование распределения частиц потока по временам пребывания практически сравним при удельных скоростях потока менее 0,5 л/л.час.