



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010147435/10, 19.11.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 19.11.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 19.11.2010

(45) Опубликовано: 10.08.2012 Бюл. № 22

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
 поиске: RU 2019564 C1, 15.09.1994. RU 2126053 C1,  
 10.02.1999. SU 1773937 A1, 07.11.1992. SU  
 1666537 A1, 30.07.1991. SU 1621823 A1,  
 23.01.1991. RU 2364622 C2, 27.10.2005.

Адрес для переписки:  
 394036, г.Воронеж, пр-кт Революции, 19, ГОУ  
 ВПО ВГТА, отдел интеллектуальной  
 собственности

(72) Автор(ы):

Шевцов Александр Анатольевич (RU),  
 Пономарёв Александр Владимирович (RU),  
 Шенцова Евгения Сергеевна (RU),  
 Дранников Алексей Викторович (RU),  
 Ситников Николай Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное  
 учреждение высшего профессионального  
 образования Воронежская государственная  
 технологическая академия (ГОУ ВПО  
 ВГТА) (RU)

(54) СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ФОТОАВТОТРОФНЫХ  
 МИКРООРГАНИЗМОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к биотехнологии и может быть использовано при автоматизации процесса культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов. Исходную питательную среду вместе с инокулятом автотрофного микроорганизма подают из технологической емкости во входную секцию фотобиореактора с формированием на внутренней поверхности прозрачных цилиндрических трубок пленки сусpenзии фотоавтотрофного микроорганизма гравитационно стекающей вниз. Одновременно вовнутрь этих трубок с помощью патрубков подают смесь воздуха с углекислым газом в противоточном режиме с истечением пленки сусpenзии. При течении по внутренней поверхности прозрачных цилиндрических трубок сусpenзия фотоавтотрофного микроорганизма попадает в секцию освещения, в которой ее непрерывно освещают люминесцентной лампой. Из прозрачных цилиндрических трубок сусpenзия фотоавтотрофного микроорганизма стекает в

выходную секцию фотобиореактора, где подвергается барботажу, который позволяет дополнительно насытить клетки углекислым газом и освещается горизонтальной торOIDальной лампой. При этом внешнюю поверхность прозрачных цилиндрических трубок последовательно охлаждают охлаждающим воздухом в секции освещения и охлаждающей водой в секции охлаждения с перемещением охлаждающего воздуха охлаждающей воды по соответствующим контурам рециркуляции. В сусpenзию фотоавтотрофного микроорганизма на входе во входную секцию фотобиореактора непрерывно вводят питательную среду из основного и корректирующего потоков, подаваемых сначала в технологическую емкость, а затем в контур рециркуляции сусpenзии. Отработанную смесь воздуха с углекислым газом из фотобиореактора подают в смеситель с помощью компрессора по контуру рециркуляции смеси воздуха с углекислым газом с промежуточным сбором в

R U 2 4 5 8 1 4 7 C 2

газовой емкости. Пену, образовавшуюся после барботажа, непрерывно отводят из нижней части фотобиореактора в сепаратор-пеногаситель с последующим ее разделением на суспензию, направляемую во входную секцию фотобиореактора, и смесь воздуха с углекислым газом, объединяемую с отработанной смесью воздуха с углекислым газом в контуре ее регуляции с промежуточным сбором в газовой емкости и подаваемой в смеситель с дополнительным насыщением отработанной смеси воздуха с углекислым газом необходимым количеством углекислого газа. Насыщенную углекислым газом смесь воздуха с углекислым газом выводят из смесителя по двум потокам, один из которых в качестве основного потока направляют вовнутрь цилиндрических прозрачных трубок в противоточном режиме, второй - на барботаж суспензии в выходную часть фотобиореактора. Из выходной части фотобиореактора

суспензию микроорганизмов выводят в контур рециркуляции суспензии с промежуточным выделением из суспензии образовавшегося в процессе культивирования кислорода с помощью десорбера и последующим отводом его посредством вентилятора и выводом другой части суспензии фотоавтотрофных микроорганизмов в сборник готовой биомассы с последующим измерением необходимых значений для создания оптимальных условий для культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов. Изобретение позволяет повысить эффективность культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов, создать возможность для встраивания предлагаемого способа в существующие производственные линии, повысить энергетическую эффективность и производительность процесса культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов. 2 пр., 1 ил.



## (12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: 2010147435/10, 19.11.2010

(24) Effective date for property rights:  
19.11.2010

Priority:

(22) Date of filing: 19.11.2010

(45) Date of publication: 10.08.2012 Bull. 22

Mail address:  
394036, g.Voronezh, pr-kt Revoljutsii, 19, GOU  
VPO VGTA, otdel intellektual'noj sobstvennosti

(72) Inventor(s):

Shevtsov Aleksandr Anatol'evich (RU),  
Ponomarev Aleksandr Vladimirovich (RU),  
Shentsova Evgenija Sergeevna (RU),  
Drannikov Aleksej Viktorovich (RU),  
Sitnikov Nikolaj Jur'evich (RU)

(73) Proprietor(s):

Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie  
vysshego professional'nogo obrazovaniya  
Voronezhskaja gosudarstvennaja  
tekhnologicheskaja akademija (GOU VPO VGTA)  
(RU)

## (54) METHOD OF CONTROL OF PHOTOAUTOTROPHIC MICROORGANISM CULTIVATION PROCESS

(57) Abstract:

FIELD: medicine.

SUBSTANCE: initial nutrient medium together with an inoculated autotrophic microorganism is supplied from a technological container into an input section of a photobioreactor with forming a suspension film of a photoautotrophic microorganism flowing down by gravity on an internal surface of transparent cylindrical tubes. Simultaneously, mixed air and carbon dioxide are reverse-flow supplied inside the tubes with using sleeves with suspension film outflow. The photoautotrophic microorganism suspension flowing in the internal surface of the transparent cylindrical tubes gets into a light section wherein it is continuously illuminated with a fluorescent tube. From the transparent cylindrical tubes, the photoautotrophic microorganism suspension flows down in an output section of the photobioreactor wherein it is bubbled to saturate the cells with carbon dioxide additionally and illuminated with a horizontal toroidal lamp. An external surface of the transparent cylindrical tubes is sequentially cooled in cooling air in the light section and in cooling water in the cooling section with cooling air and cooling water flowing in the respective recirculation loops. The photoautotrophic microorganism suspension is added with a nutrient medium of main and correction flows supplied into a technological container at first and then into the

suspension recirculation loop at the input of the input section of the photobioreactor. Waste mixed air and carbon dioxide are supplied from the photobioreactor into the mixer by means of a compressor through the mixed air and carbon dioxide recirculation loop and temporarily collected in a gas tank. Post-bubble foam is continuously discharged from a lower section of the photobioreactor into an anti-foaming separator and separated into a suspension supplied into the input section of the photobioreactor and mixed air and carbon dioxide combined with waste mixed air and carbon dioxide in a regulation loop, while being temporarily collected in the gas tank and supplied into the mixer with extra saturation of waste mixed air and carbon dioxide with a required amount of carbon dioxide. Carbon dioxide saturated mixed air and carbon dioxide are discharged from the mixed by two ducts one of which being a main flow is reverse-flow directed inside the transparent cylindrical tubes; the other one is supplied into the output portion of the photobioreactor when bubbling the suspension. From the output portion of the photobioreactor, the microorganism suspension is discharged from the suspension recirculation loop with intermediate vented out oxygen release accompanying a cultivation process with using a desorber; another portion of the photoautotrophic microorganism suspension is discharged in a finished biomass collector to be

R U 2 4 5 8 1 4 7 C 2

R U 2 4 5 8 1 4 7 C 2

R U 2 4 5 8 1 4 7 C 2

measured for the required values for the purpose of creating optimal conditions for photoautotrophic microorganism cultivation.

EFFECT: invention provides higher effectiveness of photoautotrophic microorganism cultivation,

enabled integration of the presented method into the current production lines, improved energy efficiency and performance of photoautotrophic microorganism cultivation.

2 ex, 1 dwg

R U 2 4 5 8 1 4 7 C 2

Изобретение относится к автоматизации процессов микробиологических производств и может быть использовано при автоматизации процесса культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому эффекту является способ культивирования фотосинтезирующих микроорганизмов [Патент РФ №2019564, МПК<sup>5</sup> C12Q 3/00. Способ культивирования фотосинтезирующих микроорганизмов и установка для его осуществления / В.Л.Корбут. - №2005112085; заявл. 01.11.1990; опубл. 15.09.1994. Бюл. №26], включающий регулирование температуры супензии фотоавтотрофных микроорганизмов, подачу супензии в фотопрессор, поддержание максимального значения интенсивности фотосинтеза путем изменения температуры супензии и совмещения фотосинтеза с управляемым теплообменом, обогащение супензии углекислым газом в газообменнике, освещение фотобиопрессора искусственным источником света, охлаждение супензии в процессе культивирования холодным теплоносителем, удаление выделившегося в результате культивирования кислорода с помощью его разбавления воздухом, измерение концентрации кислорода в супензии и в воздухе, температуры супензии, регулирование расхода холодного теплоносителя.

Однако известный способ имеет ряд недостатков:

- не позволяет в полной мере обеспечить стабилизацию pH супензии в процессе культивирования из-за отсутствия оперативного регулирования подачи питательной среды и создать оптимальные условия для биохимических реакций, обеспечивающих стабильность прироста клеток микроорганизмов;

- не предусматривает отвод пены, образующейся при вводе газовоздушной смеси в супензию, что затрудняет перемещение супензии по трубопроводам и снижает эффективность поглощения энергии освещения;

- при продувании супензии воздухом возможно ингибирование процесса

фотосинтеза кислородом вследствие его неполного удаления;

- не позволяет в полной мере увеличить скорость прироста клеток в процессе культивирования фотоавтотрофного микроорганизма, так как не поддерживает определенного соотношения между количеством молекул CO<sub>2</sub> и количеством квантов света в соответствии с реакцией фотосинтеза за счет синхронного изменения освещенности от источника света и концентрации углекислого газа в газовоздушной смеси;

- не позволяет сократить поле допуска на температуру супензии и сузить ее разброс в процессе культивирования, что негативно влияет на устойчивость

накопления биомассы и интенсивность процесса биосинтеза для мезофильных и криофильных фотоавтотрофных микроорганизмов;

- не позволяет снизить энергозатраты на единицу получаемой биомассы из-за отсутствия точности и надежности управления технологическими параметрами в процессе культивирования фотоавтотрофного микроорганизма.

Технической задачей изобретения является повышение эффективности культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов; интенсификация синтеза биологически активных веществ; создание возможности для встраивания предлагаемого способа в существующие производственные линии при алголизации выпускаемой продукции; снижение энергетических затрат процесса культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов за счет точности и надежности управления технологическими параметрами.

Для решения технической задачи изобретения в способе управления процессом

культивированиями фотоавтотрофных микроорганизмов, предусматривающем подачу супензии фотоавтотрофного микроорганизма в фотобиореактор, обогащение супензии углекислым газом, освещение фотобиореактора искусственным источником света, охлаждение супензии в процессе культивирования холдным теплоносителем, 5 удаление выделившегося в результате культивирования кислорода, измерение концентрации растворенного в супензии кислорода и температуры супензии, регулирование расхода холдного теплоносителя, новым является то, что культивирование фотоавтотрофных микроорганизмов осуществляют в пленке 10 супензии, стекающей по внутренней поверхности цилиндрических прозрачных трубок, установленных в фотобиореакторе, при этом наружную поверхность трубок охлаждают последовательно охлаждающим воздухом и охлаждающей водой, являющихся холдными теплоносителями; в супензии фотоавтотрофного 15 микроорганизма на входе в фотобиореактор непрерывно вводят питательную среду, подготовку которой осуществляют из составляющих ее основного и корректирующего потоков, подаваемых сначала в технологическую емкость, а затем в контур рециркуляции супензии на входе в фотобиореактор; в качестве 20 искусственного источника света используют две люминесцентные лампы; получают смесь воздуха с углекислым газом в смесителе и выводят ее из смесителя по двум потокам, один из которых направляют вовнутрь цилиндрических прозрачных трубок в противоточном режиме со стекающей пленкой супензии фотоавтотрофного 25 микроорганизма для осуществления абсорбции углекислого газа пленкой супензии, а другой - на барботаж супензии, непрерывно заполняющей нижнюю часть фотобиореактора; отработанную смесь воздуха с углекислым газом из 30 фотобиореактора сначала выводят в газовую емкость, а затем возвращают в смеситель в режиме замкнутого цикла с дополнительной подпиткой углекислым газом; пену, возникающую при барботаже, непрерывно выводят из нижней части фотобиореактора в сепаратор-пеногаситель, где ее разделяют на супензию, 35 возвращаемую в фотобиореактор, и смесь воздуха с углекислым газом, которую объединяют с отработанной смесью воздуха с углекислым газом в контуре ее рециркуляции перед смесителем; после фотобиореактора из супензии фотоавтотрофного микроорганизма выделяют образовавшийся в процессе 40 культивирования кислород в десорбере с последующим возвратом одной части супензии в фотобиореактор и выводом другой ее части в виде готовой биомассы в сборник урожая; дополнительно измеряют оптическую плотность супензии фотоавтотрофного микроорганизма на выходе из фотобиореактора, расход супензии 45 фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции на входе в фотобиореактор и в линии подачи в сборник урожая; расход пены из нижней части фотобиореактора в сепаратор-пеногаситель; pH супензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре ее рециркуляции; расходы основного и корректирующего потоков питательной среды, подаваемых в контур рециркуляции супензии на входе в 50 фотобиореактор; расходы углекислого газа и смеси воздуха с углекислым газом, направляемых в цилиндрические прозрачные трубы и на барботаж; расходы охлаждающего воздуха и охлаждающей воды; уровень супензии в нижней части фотобиореактора; и осуществляют стабилизацию оптической плотности супензии фотоавтотрофного микроорганизма на выходе из фотобиореактора в интервале заданных значений; причем при отклонении оптической плотности супензии фотоавтотрофного микроорганизма от интервала заданных значений в меньшую сторону сначала синхронно увеличивают освещенность цилиндрических прозрачных

трубок и концентрацию углекислого газа в смеси с воздухом до достижения их максимального значения, затем увеличивают расход питательной среды на входе в фотобиореактор до достижения его максимального значения и затем воздействуют на соотношение расходов суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре 5 рециркуляции суспензии и линии отвода из контура рециркуляции в сборник урожая путем увеличения расхода суспензии в контуре рециркуляции, снижая при этом производительность фотобиореактора по готовой биомассе, а при отклонении оптической плотности суспензии от интервала заданных значений в большую сторону 10 сначала воздействуют на соотношение расходов суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции суспензии и линии отвода из контура рециркуляции в сборник урожая путем увеличения расхода суспензии в сборник урожая, увеличивая при этом производительность фотобиореактора по готовой биомассе, затем снижают расход питательной среды и освещенность до выхода 15 оптической плотности суспензии на верхнюю границу заданного интервала значений; подготовку питательной среды осуществляют по заданной величине pH суспензии в контуре ее рециркуляции воздействием на соотношение расходов основного и корректирующего потоков питательной среды; устанавливают расход смеси воздуха с 20 углекислым газом по расходу суспензии на входе в фотобиореактор воздействием на расход углекислого газа, подаваемого по линии подпитки в смеситель, с коррекцией по концентрации углекислого газа в смеси воздуха с углекислым газом на выходе из фотобиореактора; при превышении максимально заданного давления смеси воздуха с углекислым газом в газовой емкости и смесителе производят сброс давления смеси 25 воздуха с углекислым газом через предохранительные клапаны; температуру суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в фотобиореакторе регулируют изменением расходов охлаждающего воздуха и охлаждающей воды для охлаждения наружной поверхности трубок; по текущему значению концентрации растворенного в 30 суспензии кислорода в контуре ее рециркуляции воздействуют на расход кислорода в линии отвода из десорбера; по расходу пены из нижней части фотобиореактора устанавливают мощность привода сепаратора-пеногасителя.

Технический результат изобретения заключается в повышении эффективности 35 культивирования вследствие интенсификации прироста биомассы и синтеза биологически активных веществ за счет повышения точности и надежности управления технологическими параметрами, а также за счет увеличения числа потенциально возможных управляющих воздействий на процесс культивирования 40 фотоавтотрофных микроорганизмов; кроме того, технический результат заключается в создании условий для встраивания предлагаемого способа в существующие производственные линии при алголизации выпускаемой продукции, а также в повышении энергетической эффективности благодаря снижению удельных энергозатрат.

На фиг.1 представлена схема, реализующая предлагаемый способ управления 45 процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов.

Схема содержит фотобиореактор 1, состоящий из входной секции 2, секции освещения 3, охлаждения 4 и выходной секции 5, содержащий люминесцентные лампы: цилиндрическую 6 и тороидальную 7, прозрачные цилиндрические трубы 8, патрубки 50 для ввода в трубы 8 смеси воздуха с углекислым газом 9 и барботер 10; сборник урожая 11 и технологическую емкость 12; ультратермостаты для регенерации охлаждающего воздуха 13 и охлаждающей воды 14; смеситель воздуха с углекислым газом 15; газовую емкость 16; десорбер кислорода 17; сепаратор-пеногаситель 18;

циркуляционную помпу 19; насос 20, компрессор 21, вентиляторы 22 и 23; коллектор 24; распределители потоков 25 и 26; микропроцессор 27; контуры рециркуляции: суспензии фотоавтотрофного микроорганизма 0.1.1, смеси воздуха с углекислым газом 5.7, охлаждающего воздуха 3.2, охлаждающей воды 1.1; линии подачи: готовой биомассы в сборник урожая 0.1.2, основного 0.2.1 и корректирующего 0.2.2 потоков питательной среды, углекислого газа 5.4, смеси воздуха с углекислым газом в прозрачные цилиндрические трубы 5.7.1 и в барботер 5.7.2; линии отвода: готовой биомассы из сборника урожая 0.1.3, пены из выходной секции фотобиореактора 0.3, суспензии из сепаратора-пеногасителя 0.1.4, смеси воздуха с углекислым газом из сепаратора-пеногасителя 5.7.3, кислорода 3.7, смеси воздуха с углекислым газом из смесителя 5.7.4 и из газовой емкости 5.7.5; датчики: ТЕ - температуры, FE - расхода, LE - уровня, pH - среды, QE - оптической плотности, СЕ - концентрации; И - исполнительные механизмы; ↓ - входные каналы 15 управления; ↑ - выходные каналы управления.

Способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов осуществляется следующим образом.

Исходную питательную среду фотоавтотрофного микроорганизма подают из технологической емкости 12 во входную секцию 2 пленочного фотобиореактора 1, где на внутренней поверхности прозрачных цилиндрических трубок 8 формируется пленка суспензии фотоавтотрофного микроорганизма, которая гравитационно стекает вниз. Одновременно вовнутрь прозрачных цилиндрических трубок 8 с помощью патрубков 9 подают смесь воздуха с углекислым газом в противоточном режиме с истечением пленки суспензии. При течении по внутренней поверхности прозрачных цилиндрических трубок 8 суспензия фотоавтотрофного микроорганизма попадает в секцию освещения 3, в которой ее непрерывно освещают цилиндрической люминесцентной лампой 6. В результате совместного воздействия на суспензию смеси воздуха с углекислым газом и освещения осуществляют процесс культивирования, характеризующийся абсорбцией углекислого газа из его смеси с воздухом (газовой фазы) пленкой суспензии. Абсорбция способствует перемещению молекул CO<sub>2</sub> к клеткам фотоавтотрофного микроорганизма и их усвоению. При этом протекает реакция фотосинтеза, сопровождающаяся накоплением органического вещества в клетках, их ростом и развитием.

Из прозрачных цилиндрических трубок 8 суспензия фотоавтотрофного микроорганизма стекает в выходную секцию 5 фотобиореактора, где подвергается барботажу смеси воздуха с углекислым газом посредством барботера 10 и освещается горизонтальной торoidalной люминесцентной лампой 7. Наличие барботера в нижней части фотобиореактора позволяет дополнительно насытить клетки фотоавтотрофного микроорганизма углекислым газом, что совместно с освещением горизонтальной лампой дает возможность осуществлять фотосинтез клеткам и в выходной секции, а также предотвратить седиментацию клеток на внутренние стенки 45 выходной секции фотобиореактора при использовании штаммов фотоавтотрофных микроорганизмов, не обладающих планктонными свойствами.

В результате совместной работы люминесцентных ламп 6 и 7 выделяется теплота, которую следует отводить для обеспечения необходимых условий процесса культивирования фотоавтотрофного микроорганизма и высокого качества готовой биомассы. Поэтому в способе предусмотрено последовательное охлаждение наружной поверхности прозрачных цилиндрических трубок 8 холодными теплоносителями - охлаждающим воздухом в секции освещения 3 и охлаждающей водой в секции

охлаждения 4. При этом охлаждающий воздух и охлаждающая вода перемещаются по контурам рециркуляции соответственно 3.2 и 1.1 с помощью вентилятора 22 и насоса 20 с регенерацией в ультратермостатах 13 и 14.

5 Отработанную смесь воздуха с углекислым газом из фотобиореактора подают в смеситель 15 с помощью компрессора 21 по контуру рециркуляции смеси воздуха с углекислым газом 5.7 с промежуточным сбором в газовую емкость 16. Пену, возникающую при барботаже сусpenзии в секции 5 фотобиореактора, непрерывно отводят по линии 0.3 в сепаратор-пеногаситель 18. В сепараторе-пеногасителе пену 10 разделяют на сусpenзию, возвращаемую в секцию 2 фотобиореактора по линии 0.1.4, и смесь воздуха с углекислым газом, которую по линии 5.7.3 направляют в контур рециркуляции смеси воздуха с углекислым газом 5.7 и тем самым объединяют с отработанной смесью воздуха с углекислым газом, выходящей из фотобиореактора в смеситель 15. В смесителе дополнительно осуществляют насыщение отработанной 15 смеси воздуха с углекислым газом по линии 5.4 количеством углекислого газа, равным использованному при культивировании фотоавтотрофного микроорганизма в фотобиореакторе.

Из смесителя 15 полученную смесь воздуха с углекислым газом с помощью 20 распределителя потоков 25 разделяют на два потока, один из которых направляют в качестве основного потока по линии 5.7.1 в коллектор 24 с последующим вводом вовнутрь цилиндрических прозрачных трубок, а другой по линии 5.7.2 в барботер 10. Коллектор 24 конструктивно выполнен таким образом, что позволяет разделить основной поток на равные части, количество которых соответствует числу 25 прозрачных цилиндрических трубок 8.

Из секции 5 фотобиореактора сусpenзию фотоавтотрофного микроорганизма выводят в контур рециркуляции сусpenзии фотоавтотрофного микроорганизма 0.1.1 30 циркуляционной помпой 19 с выделением из сусpenзии в десорбере 17 образовавшегося в процессе культивирования кислорода и его отводом по линии 3.7 посредством вентилятора 23.

Одну часть сусpenзии возвращают в фотобиореактор по контуру рециркуляции сусpenзии фотоавтотрофного микроорганизма 0.1.1, а другую в качестве готовой биомассы отводят в сборник урожая 11. Отбор готовой биомассы в сборник урожая 35 по линии 0.1.2 осуществляют с помощью распределителя потоков 26, откуда по линии 0.1.3 ее подают в основное производство (в случае встраивания предлагаемого способа в существующие производственные линии при алголизации выпускаемой продукции) или отпускают в качестве готовой продукции потребителю.

Информация о ходе процесса культивирования фотоавтотрофных 40 микроорганизмов с помощью датчиков передается в микропроцессор 27, который по заложенному в него программно-логическому алгоритму осуществляет оперативное управление технологическими параметрами посредством исполнительных механизмов с учетом накладываемых на них ограничений, обусловленных как интенсивным 45 получением биомассы, так и экономической целесообразностью.

Микропроцессор 27 непрерывно сравнивает текущее значение оптической 50 плотности сусpenзии фотоавтотрофного микроорганизма с интервалом заданных значений. При отклонении оптической плотности сусpenзии фотоавтотрофного микроорганизма от интервала заданных значений в меньшую сторону микропроцессор 27 сначала синхронно увеличивает освещенность цилиндрических прозрачных трубок 8 лампами 6, 7 и концентрацию углекислого газа в смеси с воздухом путем увеличения его расхода в смеситель 15 по линии 5.4 до достижения их

максимального значения.

Синхронное увеличение освещенности цилиндрических прозрачных трубок и концентрации углекислого газа объясняется необходимым условием в реализации процесса культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов, в основе которого лежит реакция фотосинтеза [Мокроносов А.Т. и др. Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты. - 2006. - 448 с].

Если синхронное увеличение освещенности цилиндрических прозрачных трубок и концентрации углекислого газа не позволяет вывести текущее значение оптической плотности фотоавтотрофного микроорганизма на интервал заданных значений, то микропроцессор увеличивает расход питательной среды на входе в фотобиореактор 1 до достижения его максимального значения.

Если по результату сравнения текущая величина оптической плотности супензии не выйдет на интервал заданных значений, то микропроцессор воздействует на соотношение расходов супензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции супензии 0.1.1 и линии отвода 0.1.2 из контура рециркуляции в сборник урожая 11 путем увеличения расхода супензии в контуре рециркуляции, снижая при этом производительность фотобиореактора по готовой биомассе.

При отклонении оптической плотности супензии фотоавтотрофного микроорганизма от интервала заданных значений в большую сторону микропроцессор 27 сначала воздействует на соотношение расходов супензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции супензии 0.1.1 и линии отвода из контура рециркуляции в сборник урожая 0.1.2 путем увеличения расхода супензии в сборник урожая, увеличивая при этом производительность фотобиореактора по готовой биомассе, затем снижает расход питательной среды в линиях 0.2.1 и 0.2.2, освещенность и концентрацию углекислого газа в смеси с воздухом до выхода оптической плотности супензии фотоавтотрофного микроорганизма на верхнюю границу заданного интервала значений.

Соотношение расходов основной и корректирующей питательных сред соответственно в линиях 0.2.1 и 0.2.2 устанавливают по текущему значению pH супензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции 0.1.1. Оптимальной для большинства фотоавтотрофных микроорганизмов является 35 нейтрально-щелочная или слабощелочная среда. В процессе их культивирования, как правило, происходит «защелачивание» супензии, поэтому основная питательная среда должна иметь щелочную реакцию, а корректирующая - кислую. В качестве корректирующей среды используют нитрат аммония  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

40 Микропроцессор 27 по текущему расходу основного потока питательной среды в линии 0.2.1 устанавливает расход смеси воздуха с углекислым газом в контуре ее рециркуляции 5.7.

По текущему значению расхода супензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции 0.1.1 микропроцессор 27 устанавливает расход отработанной 45 газовоздушной смеси в смеситель 15 по контуру рециркуляции 5.7 воздействием на регулируемый привод компрессора 21 с коррекцией по текущим расходам газовоздушной смеси в линиях подачи на барботаж 5.7.2 и в цилиндрические прозрачные трубы 5.7.1.

50 Микропроцессор устанавливает расход углекислого газа в смеситель 15 по линии 5.4 по текущему значению расхода отработанной газовоздушной смеси в контуре рециркуляции 5.7 с коррекцией по текущему значению концентрации в смеси углекислого газа.

При превышении максимально заданного давления смеси воздуха с углекислым газом в газовой емкости 16 и смесителе 15 осуществляется аварийный сброс давления смеси воздуха с углекислым газом через предохранительные клапаны соответственно по линиям 5.7.5 и 5.7.4. Установка газовой емкости 16 обусловлена необходимостью 5 обеспечения устойчивой и бесперебойной совместной работы всех элементов схемы, в случае возмущающих внутренних и внешних воздействий.

Температуру суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в фотобиореакторе микропроцессор регулирует изменением расходов охлаждающего воздуха и 10 охлаждающей воды соответственно в контурах рециркуляции 3.2 и 1.1 воздействием на регулируемые приводы вентилятора 22 и насоса 20.

Применение охлаждающего воздуха и охлаждающей воды в качестве холодных теплоносителей в различных секциях фотобиореактора обусловлено его 15 конструктивными особенностями, в частности наличие в секции освещения люминесцентной лампы не позволяет цилиндрические трубы охлаждать водой.

По текущему значению концентрации растворенного в суспензии кислорода в контуре рециркуляции 0.1.1 микропроцессор устанавливает мощность регулируемого привода вентилятора 23 в линии 3.7 отвода газообразного кислорода из десорбера 17.

По текущему значению расхода пены в линии 0.3 микропроцессор устанавливает 20 необходимую мощность регулируемого привода сепаратора-пеногасителя 18.

В случае превышения верхнего заданного значения уровня суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в секции 5 фотобиореактора микропроцессор 25 отключает подачу питательной среды из технологической емкости 12 в контур рециркуляции 0.1.1, а при достижении нижнего заданного значения уровня суспензии в секции 5 осуществляет соответствующее увеличение расхода питательной среды из емкости 12 в контур рециркуляции 0.1.1.

Примеры реализации способа.

Способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных 30 микроорганизмов реализован в опытно-промышленных условиях на территории Воронежского экспериментального комбикормового завода.

Процесс культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов осуществлялся по описанному выше способу с использованием пленочного фотобиореактора [Патент 35 РФ №2363728, МПК<sup>7</sup> C12M 1/04, C12M 1/06, B01D 3/28. Пленочный аппарат / А.А.Шевцов, Е.С.Шенцова, А.В.Дранников, А.В.Пономарев - №2008118450; заявл. 13.05.2008; опубл. 10.08.2009, Бюл №22] со следующими техническими характеристиками:

40 температура культивирования 20...50°C

оптическая плотность суспензии фотоавтотрофного микроорганизма:

исходной суспензии	0,2...0,4 ед. опт. пл.
готовой суспензии	1,5...2,0 ед. опт. пл.
производительность по готовой суспензии	400...600 дм <sup>3</sup> /сут

расход смеси воздуха с углекислым газом:

50	в прозрачные цилиндрические трубы	0,30 м <sup>3</sup> /(ч·л)
	на барботаж	0,07 м <sup>3</sup> /(ч·л)
	концентрация углекислого газа в смеси с воздухом	3...8%
	начальная освещенность	10...50 клк

расход питательной среды	5 дм <sup>3</sup> /ч
начальный расход охлаждающего воздуха	1,0...1,5 м <sup>3</sup> /ч
начальный расход охлаждающей воды	0,05...0,15 м <sup>3</sup> /ч

5 габаритные размеры корпуса:

высота 3,2 м  
диаметр 1,1 м

10 характеристики цилиндрических прозрачных трубок:

высота 2,5 м  
диаметр 0,07 м

15 Процесс культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов заключался в дозированной подаче основного и корректирующего потоков питательной среды, смеси воздуха с углекислым газом, охлаждающего воздуха и охлаждающей воды для компенсации тепловых выделений от ламп. Из контура рециркуляции суспензии 20 фотоавтотрофного микроорганизма отводили кислород, образующийся в процессе фотосинтеза клеток. При достижении суспензией фотоавтотрофного микроорганизма заданного значения оптической плотности вследствие увеличения числа клеток микроорганизма в суспензии ее часть - «готовая суспензия» отводили в сборник 25 урожая с одновременным подводом эквивалентного по объему количества питательной среды.

25 Стабилизация температуры суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в процессе культивирования осуществлялась следующим образом. Единственным фактором, вызывавшим дестабилизацию температурного режима, являлся нагрев суспензии фотоавтотрофного микроорганизма люминесцентными лампами, поэтому 30 отклонение текущего значения температуры суспензии, как правило, происходило только в большую сторону от интервала заданных значений. Для охлаждения использовались охлаждающий воздух и охлаждающая вода с температурой 10°C. Известно, что колебания температуры суспензии в пределах 5°C благоприятно сказываются на интенсивности прироста биомассы [Константинов А.С. и др. // 35 Вестник Моск. ун-та (сер. биология). - 1998. - №1. - С.47-50].

Пример №1. В качестве объекта культивирования использована зеленая микроскопическая водоросль *Chlorella vulgaris* (штамм УА-1-20).

40 В белке *Chlorella vulgaris* содержатся все незаменимые аминокислоты, различные микроэлементы, природный антибиотик хлореллин, арахидоновая кислота (условно незаменимая, нормализует репродуктивную функцию), хлон «А» (индуцирует выработку интерферона). Для клеток *Chlorella vulgaris* нормой является выделение в суспензию различных полезных продуктов обмена веществ (экзаметаболитов) [Станчев П. // Гидробиология. - 1980. - №10. - С.70-77.].

45 В качестве питательной среды для культивирования *Chlorella vulgaris* использовалась среда Тамия (в модификации Кузнецова и Владимиrowой), имевшая следующий состав, г/л:

1. KNO <sub>3</sub>	5,0
2. MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	2,5
3. KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	1,25
4. Na <sub>2</sub> EDTA	0,037
5. FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,009

## 6. Микроэлементы - 1 мл

Состав раствора микроэлементов, г/л:

5	6.1. $H_3BO_3$	2,860
	6.2. $MnCl_2 \cdot 4H_2O$	1,810
	6.3. $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0,222
	6.4. $MoO_3$	0,015
	6.5. $NH_4VO_3$	0,023

10 Культивирование зеленой микроскопической водоросли *Chlorella vulgaris* проводилось по предлагаемому способу управления со следующими технологическими параметрами:

15 заданный интервал значений температуры культивирования 20...37°C

оптическая плотность суспензии:

20	исходной суспензии	0,4 ед. опт. пл.
	готовой суспензии	1,5...1,7 ед. опт. пл.
	начальная освещенность	10...15 клк
	начальный расход охлаждающего воздуха	1,3...1,5 м <sup>3</sup> /ч
	начальный расход охлаждающей воды	0,10...0,15 м <sup>3</sup> /ч

25 Выход суспензии микроскопической водоросли *Chlorella vulgaris* (штамм УА-1-20) по предлагаемому способу составил 470...510 дм<sup>3</sup>/сут при концентрации абсолютно сухих веществ 3,5...3,7 г/л.

Пример №2. В качестве объекта культивирования использована цианобактерия *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. (спирулина).

30 Биомасса *Spirulina platensis*, получаемая из ее суспензии, используется в качестве пищевой добавки в рационе человека и животных. Клетки *Spirulina platensis* - богатый источник микроэлементов (йод, селен и пр.). Спирулина используется в медицине, косметике, животноводстве, птицеводстве и т.д. Из биомассы *Spirulina platensis* получают аминокислоты, протеин, углеводы, липиды, пигменты, витамины и т.д. [Берестов В.А. Спирулина: вчера, сегодня, завтра. - С.-Пб.: Лань, 2002].

35 В качестве питательной среды для культивирования *Spirulina platensis* использовалась среда Зарукка, имевшая следующий состав, г/л:

40	1. $NaHCO_3$	16,8
	2. $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	0,66
	3. $NaNO_3$	2,5
	4. $K_2SO_4 \cdot 4H_2O$	1,0
	5. $NaCl$	1,0
45	6. $Na_2EDTA$	0,08
	7. $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0,01
	8. $CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0,04
	9. $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0,2
	10. Раствор микроэлементов по 1 мл	

50 Состав растворов микроэлементов, г/л:

Раствор 1.

Раствор 2.

10.1. $H_3BO_3$	2,860	10.6. $NiSO_4 \cdot 7H_2O$	0,045
10.2. $MnCl_2 \cdot 4H_2O$	1,810	10.7. $NH_4VO_3$	0,023
10.3. $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0,222	10.8. $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$	0,018
10.4. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0,080	10.9. $CoCl_2 \cdot 6H_2O$	0,044
5 10.5. $MoO_3$	0,015	10.10. $K_2Cr_2(SO_4)_2 \cdot 24H_2O$	0,096

Культивирование цианобактерии *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl проводилось по предлагаемому способу управления со следующими технологическими параметрами: температура культивирования:

10 заданный интервал значений температуры культивирования 29...43°C

оптическая плотность суспензии:

15	исходной суспензии	0,2 ед. опт. пл.
	готовой суспензии	1,9...2,1 ед. опт. пл.
	начальная освещенность	25...30 кЛк
	начальный расход охлаждающего воздуха	1,0...1,1 м <sup>3</sup> /ч
	начальный расход охлаждающей воды	0,05...0,10 м <sup>3</sup> /ч

20 Выход суспензии цианобактерии *Spirulina platensis* по предлагаемому способу составил 400...415 дм<sup>3</sup>/сут при концентрации 4,0...4,3 г А.С.В./л.

Таким образом, предлагаемый способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов позволяет:

- 25 - создать оптимальные условия для прироста клеток микроорганизмов за счет стабилизации рН суспензии в процессе культивирования;
- улучшить перемещение суспензии по трубопроводам и повысить эффективность поглощения энергии освещения вследствие отвода пены, образующейся при вводе 30 газовоздушной смеси в суспензию;
- увеличить скорость прироста клеток в процессе культивирования фотоавтотрофного микроорганизма за счет синхронного изменения освещенности от источника света и концентрации углекислого газа в газовоздушной смеси;
- обеспечить устойчивость накопления биомассы и интенсивность процесса 35 биосинтеза для мезофильных и криофильных фотоавтотрофных микроорганизмов за счет сужения поля допуска на температуру суспензии и уменьшения ее разброса в процессе культивирования;
- снизить удельные энергозатраты на 10...12% за счет повышения точности и 40 надежности управления технологическими параметрами в процессе культивирования фотоавтотрофного микроорганизма;
- встраивать предлагаемую технологию в состав имеющихся производственных линий.

45 Формула изобретения

Способ управления процессом культивирования фотоавтотрофных микроорганизмов, предусматривающий подачу суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в фотобиореактор, обогащение суспензии углекислым газом, освещение фотобиореактора искусственным источником света, охлаждение суспензии 50 в процессе культивирования холодным теплоносителем, удаление выделившегося в результате культивирования кислорода, измерение концентрации растворенного в суспензии кислорода и температуры суспензии, регулирование расхода холодного

теплоносителя, отличающийся тем, что культивирование фотоавтотрофных микроорганизмов осуществляют в пленке суспензии, стекающей по внутренней поверхности цилиндрических прозрачных трубок, установленных в фотобиореакторе, при этом наружную поверхность трубок охлаждают последовательно охлаждающим воздухом и охлаждающей водой, являющихся холодными теплоносителями, в суспензию фотоавтотрофного микроорганизма на входе в фотобиореактор непрерывно вводят питательную среду, подготовку которой осуществляют из составляющих ее основного и корректирующего потоков, подаваемых сначала в 5 технологическую емкость, а затем в контур рециркуляции суспензии на входе в фотобиореактор, в качестве искусственного источника света используют две люминесцентные лампы, получают смесь воздуха с углекислым газом в смесителе и выводят ее из смесителя по двум потокам, один из которых направляют вовнутрь 10 цилиндрических прозрачных трубок в противоточном режиме со стекающей пленкой суспензии фотоавтотрофного микроорганизма для осуществления абсорбции углекислого газа пленкой суспензии, а другой - на барботаж суспензии, непрерывно 15 заполняющей нижнюю часть фотобиореактора, отработанную смесь воздуха с углекислым газом из фотобиореактора сначала выводят в газовую емкость, а затем 20 возвращают в смеситель в режиме замкнутого цикла с дополнительной подпиткой углекислым газом, пену, возникающую при барботаже, непрерывно выводят из нижней части фотобиореактора в сепаратор-пеногаситель, где ее разделяют на 25 суспензию, возвращаемую в фотобиореактор, и смесь воздуха с углекислым газом, которую объединяют с отработанной смесью воздуха с углекислым газом в контуре ее рециркуляции перед смесителем, после фотобиореактора из суспензии 30 фотоавтотрофного микроорганизма выделяют образовавшийся в процессе культивирования кислород в десорбере с последующим возвратом одной части суспензии в фотобиореактор, и выводом другой ее части в виде готовой биомассы в сборник урожая, дополнительно измеряют оптическую плотность суспензии 35 фотоавтотрофного микроорганизма на выходе из фотобиореактора, расход суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции на входе в фотобиореактор и в линии подачи в сборник урожая, расход пены из нижней части фотобиореактора в сепаратор-пеногаситель, pH суспензии фотоавтотрофного 40 микроорганизма в контуре ее рециркуляции, расходы основного и корректирующего потоков питательной среды, подаваемых в контур рециркуляции суспензии на выходе в фотобиореактор, расходы углекислого газа и смеси воздуха с углекислым газом, направляемых в цилиндрические прозрачные трубы и на барботаж, расходы 45 охлаждающего воздуха и охлаждающей воды, уровень суспензии в нижней части фотобиореактора, и осуществляют стабилизацию оптической плотности суспензии фотоавтотрофного микроорганизма на выходе из фотобиореактора в интервале заданных значений, причем при отклонении оптической плотности суспензии 50 фотоавтотрофного микроорганизма от интервала заданных значений в меньшую сторону сначала синхронно увеличивают освещенность цилиндрических прозрачных трубок и концентрацию углекислого газа в смеси с воздухом до достижения их максимального значения, затем увеличивают расход питательной среды на входе в фотобиореактор до достижения его максимального значения, и затем воздействуют на соотношение расходов суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции суспензии и линии отвода из контура рециркуляции в сборник урожая путем увеличения расхода суспензии в контуре рециркуляции, снижая при этом производительность фотобиореактора по готовой биомассе, а при отклонении

оптической плотности суспензии от интервала заданных значений в большую сторону сначала воздействуют на соотношение расходов суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в контуре рециркуляции суспензии и линии отвода из контура рециркуляции в сборник урожая путем увеличения расхода суспензии в сборник урожая, увеличивая при этом производительность фотобиореактора по готовой биомассе, затем снижают расход питательной среды и освещенность до выхода оптической плотности суспензии на верхнюю границу заданного интервала значений, подготовку питательной среды осуществляют по заданной величине рН суспензии в контуре ее рециркуляции воздействием на соотношение расходов основного и корректирующего потоков питательной среды, устанавливают расход смеси воздуха с углекислым газом по расходу суспензии на входе в фотобиореактор воздействием на расход углекислого газа, подаваемого по линии подпитки в смеситель, с коррекцией по концентрации углекислого газа в смеси воздуха с углекислым газом на выходе из фотобиореактора, при превышении максимально заданного давления смеси воздуха с углекислым газом в газовой емкости и смесителе производят сброс давления смеси воздуха с углекислым газом через предохранительные клапаны, температуру суспензии фотоавтотрофного микроорганизма в фотобиореакторе регулируют изменением расходов охлаждающего воздуха и охлаждающей воды для охлаждения наружной поверхности трубок, по текущему значению концентрации растворенного в суспензии кислорода в контуре ее рециркуляции воздействуют на расход кислорода в линии отвода из десорбера, по расходу пены из нижней части фотобиореактора устанавливают мощность привода сепаратора-пеногасителя.

25

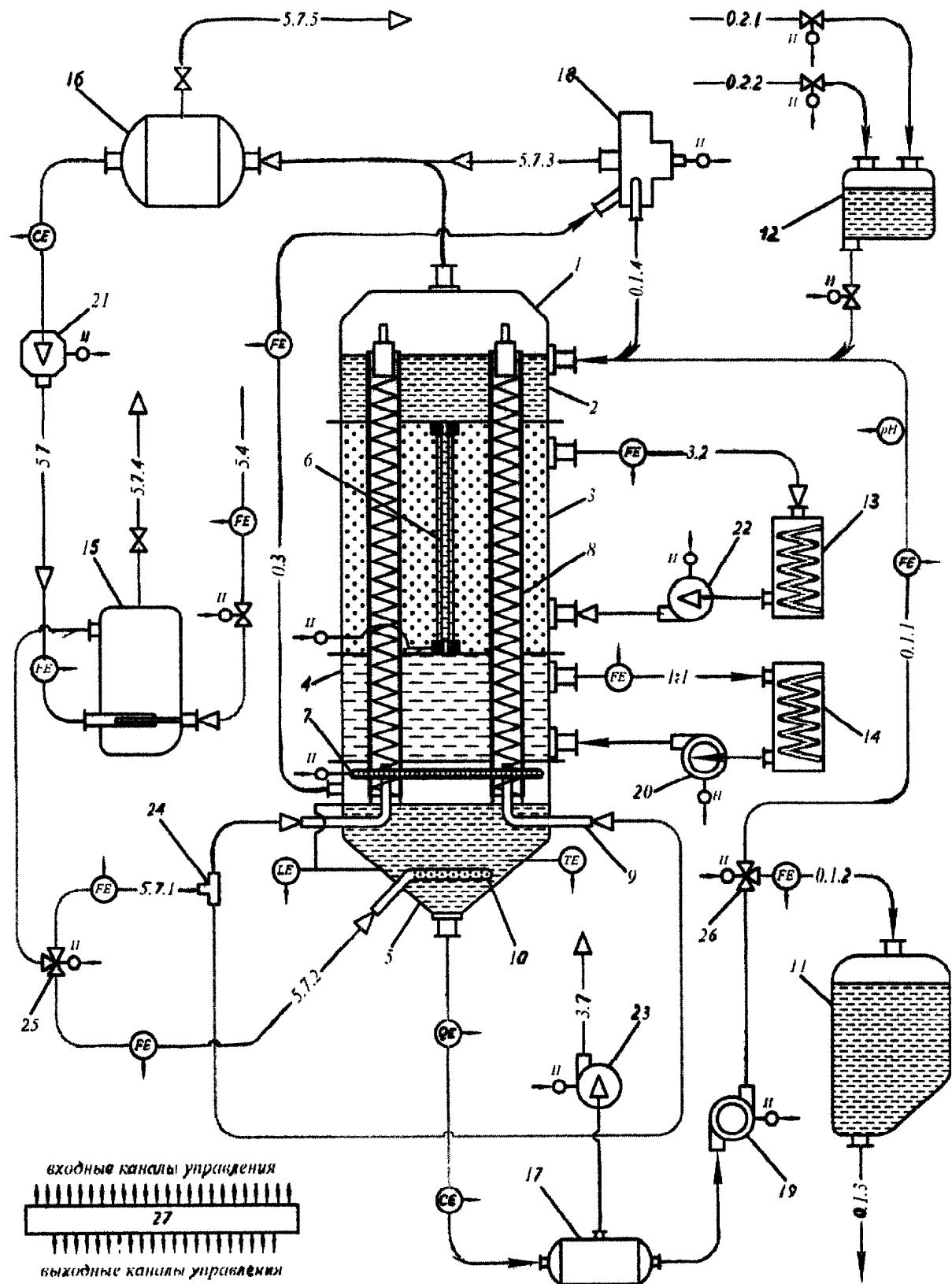
30

35

40

45

50



Фиг. 1