

Биотехнология, бионанотехнология и технология сахаристых продуктов

УДК 664.8.047.1

Старший научный сотрудник И.В. Черемушкина,
(ООО «Рета»)
профессор О.С. Корнеева, профессор А.А. Шевцов,
аспирант И.В. Мажулина
(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) тел. (473) 255-34-71

Эксергетический анализ инновационной технологии культивирования микробных продуцентов ферментов

Разработанная технология культивирования микробных продуцентов ферментов и получения порошкообразных ферментных препаратов с применением парожеторного теплового насоса обеспечивает высокую энергоэффективность и экологическую безопасность ведения процесса. Полученный высокий эксергетический КПД свидетельствует о повышении степени термодинамического совершенства технологии как системы процессов подготовки посевной культуры, непосредственного культивирования микроорганизмов, охлаждения готовой культуральной жидкости и получения порошкообразного ферментного препарата с однородным гранулометрическим составом.

The developed technology of cultivation of microbial enzyme producers and production of powdered enzyme preparations using steam-jet heat pump provides high energy efficiency and ecological safety of the process. The resulting high exergic performance indicates the increase in the degree of thermodynamic perfection of the technology as a system of processes of preparing the culture, cultivating microorganisms, cooling the finished culture liquid and obtaining the target powder product with the homogenous granulometric composition.

Ключевые слова: ферментные препараты, технология культивирования, эксергетический анализ, энергоэффективность.

Современные тенденции в развитии теории массообмена при культивировании аэробных микроорганизмов подготовили условия для научного подхода к созданию новых энергосберегающих технологий порошкообразных ферментных препаратов в замкнутых циклах по материальным и энергетическим потокам при наиболее рациональных с энергетической точки зрения схемах подключения тепловых насосов (ТН) [1]. Эффективное замещение в системах теплоснабжения технологических процессов при получении ферментных препаратов на теплоту возобновляемых и вторичных источников посредством ТН является одним из важнейших принципов энергосбережения и охраны окружающей среды [2, 3]. Это в полной мере относится к производству порошкообразных ферментных препаратов с применением теплонасосных технологий, что делает их внедрение актуальным в условиях экономического курса страны, направленного на энергосбережение и энергоэффективность [4].

Следует отметить, что традиционные способы производства ферментных препаратов не предусматривают подготовку энергоносителей и их рациональное использование при выращивании культур микроорганизмов и не могут быть эффективно реализованы в условиях, когда тепловая энергия генерируется непосредственно на предприятиях ферментной промышленности.

В результате совместных исследований разработана энергоэффективная технология культивирования микробных продуцентов ферментов и получения порошкообразных ферментных препаратов с применением парожеторного теплового насоса [2, 5].

Технологический цикл получения биомассы аэробных микроорганизмов начинается с приготовления жидкой посевной культуры в инокуляторе с охлаждающей рубашкой, устройствами перемешивания и аэрации (рисунок 1).

Инокулятор проверяют на герметичность паром, заполняют питательной средой и стерилизуют ее. После охлаждения питательной среды вносят культуру продуцента. Культивирование на всех стадиях ведут при оптимальных

температуре и аэрации. По истечении времени культивирования жидкую посевную культуру перекачивают стерильным воздухом через линию перекачивания из инокулятора в предварительно стерилизованный ферментер. Проверку на герметичность и стерилизацию ферментера проводят, как и в случае инокулятора.

Культивирование в ферментере осуществляют при механическом перемешивании питательной среды и подаче «теплой» воды в обогревающую его рубашку с целью поддержания оптимальной температуры процесса.

Культуральную жидкость из ферментера подают в предварительно стерилизован-

ные емкости для сбора готовой культуры с системой охлаждения.

Для подготовки «холодной» и «теплой» воды используется парожекторная холодильная машина, работающая в режиме теплового насоса, состоящая из эжектора; испарителя; холодоприемника; конденсатора; терморегулирующего вентиля; сборника отработанной воды, парогенератора с теплонагревательными элементами и предохранительным клапаном; насоса подачи воды в парогенератор; насоса рециркуляции хладагента через холодоприемник, работающих по замкнутому термодинамическому циклу.

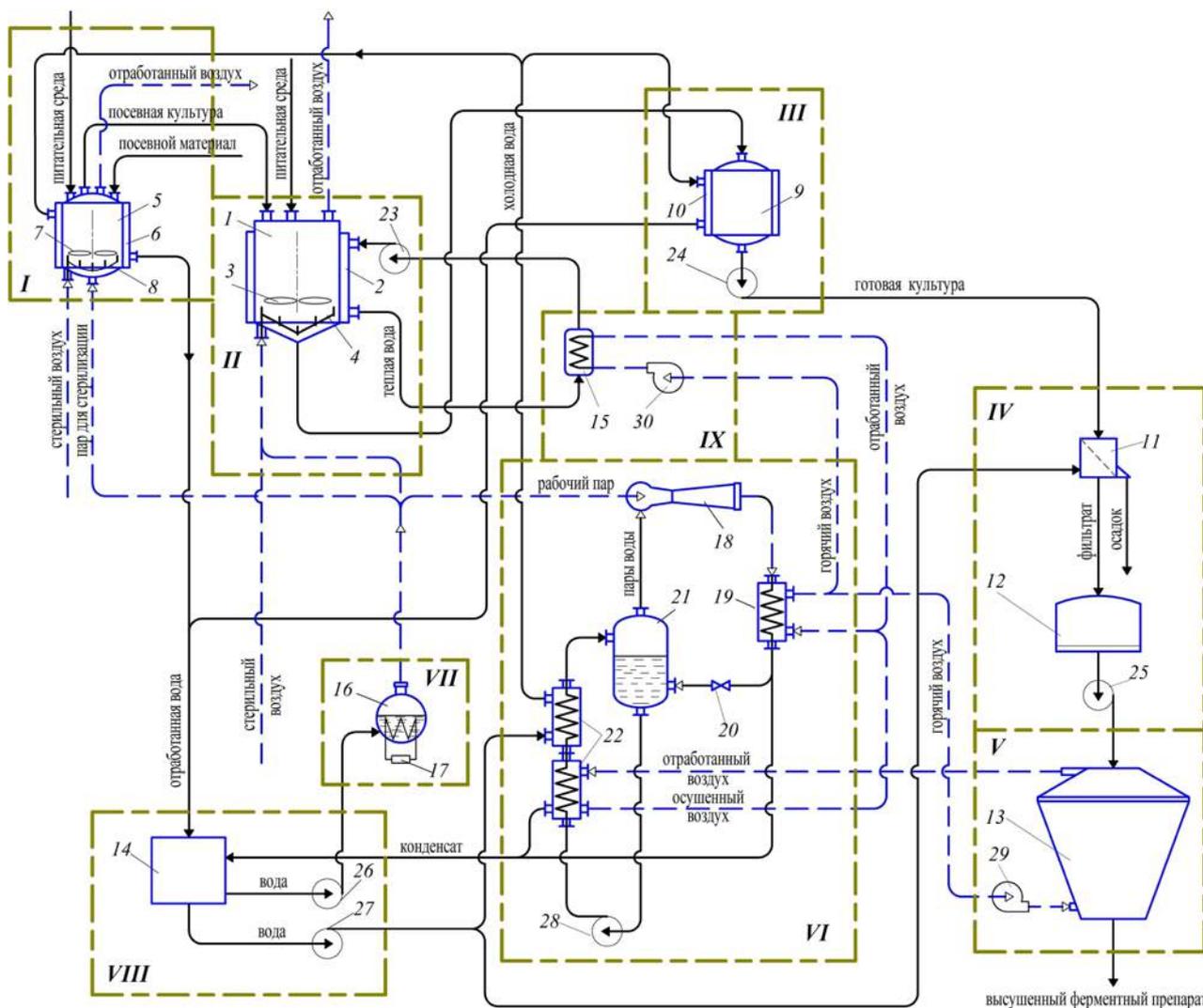


Рисунок 1 - Технологическая схема получения порошкообразных ферментных препаратов: 1 – ферментер (2 – обогревающая рубашка, 3 – мешалка, 4 – устройство аэрации); 5 – инокулятор (6 – охлаждающая рубашка, 7 – мешалка, 8 – устройство аэрации); 9 – сборник готовой культуры (10 – охлаждающая рубашка); 11 – фильтр; 12 – сборник жидкой фазы ферментного препарата; 13 – распылительная сушилка; 14 – сборник отработанной воды и конденсата; 15 – рекуперативный теплообменник; 16 – парогенератор (17 – электронагревательные элементы); 18 – эжектор; 19 – конденсатор; 20 – терморегулирующий вентиль; 21 – испаритель; 22 – холодоприемник; 23-28 – насосы; 29-30 – вентиляторы.

При этом в парогенераторе посредством электронагревательных элементов вырабатывается рабочий пар и под давлением подается в сопло эжектора, вовлекая эжектируемые пары хладагента, в качестве которого используется вода из испарителя, создавая в нем пониженное давление. За счет рециркуляции хладагента через холодоприемник получают «холодную» воду путем рекуперативного теплообмена между хладагентом и водой. Полученная «холодная» вода из холодоприемника подается в охлаждающую рубашку инокулятора и систему охлаждения сборников готовой культуры. Образовавшаяся после эжектора смесь паров хладагента и рабочего пара направляют в конденсатор. Процесс конденсации сопровождается выделением теплоты, при этом теплота конденсации в конденсаторе используется для получения «теплой» воды посредством рекуперативного теплообмена между водой и конденсирующими парами. Нагретая вода подается в обогревающую рубашку ферментера.

Часть образовавшегося после конденсатора водяного конденсата направляется через терморегулирующий вентиль в испаритель для пополнения в нем воды, а другая избыточная часть конденсата выводится из замкнутого цикла парозежекторной холодильной машины и вместе с отработанной водой после инокулятора, ферментера и сборников готовой культуры подается в сборник отработанной воды.

Готовая культура под давлением подается на фильтрование, а фильтрат культуральной жидкости направляется в распылительную сушилку.

Производственная проверка предлагаемой технологии осуществляется в две стадии. Первая стадия включает подготовку жидкой посевной культуры в инокуляторе. Вторая – процесс выращивания аэробной культуры продуцента глубинным способом культивирования в ферментере с комбинированным подводом энергии (к газовой фазе для аэрации стерильным воздухом с помощью барботера и к жидкой фазе перемешиванием с помощью механической мешалки), который заключался в дозированной подаче потоков питательной среды, инокулята (посевого материала), стерильного воздуха, «теплой» воды в обогревающую рубашку для обеспечения высокой интенсивности массо- и энергообмена микробных клеток инокулята с питательной средой за счет стабилизации параметров процесса на

уровне, требуемом для оптимального развития продуцента и образования целевого продукта. Из ферментера отводят отработанный воздух, воду и готовую культуру микроорганизмов в виде смеси, содержащей клетки, внеклеточные метаболиты и биомассу с остаточной концентрацией целевого продукта.

Процесс культивирования продуцента проводился в вертикальном ферментере фирмы «Sartorius Stedim Biotech» серии *BIOSTAT* с рабочим объемом 100 л, предназначенным для выращивания микроорганизмов или культур клеток. Контроль над параметрами процесса осуществлялся с помощью микропроцессорной системы управления DCU (Digital Control Unit). Для стабилизации температурных режимов при приготовлении жидкой посевной культуры в инокуляторе, непосредственном выращивании культуры микроорганизмов в ферментере и охлаждении готовой культуры в приемных сборниках осуществляли подготовку «теплой» и «холодной» воды с использованием парозежекторной холодильной машины, работающей в режиме теплового насоса, со следующими техническими характеристиками:

Холодопроизводительность, кВт	20
Температура кипения:	
в испарителе, °С	4
в парогенераторе, °С	154
Температура конденсации, °С	127
Температура воды на входе в конденсатор, °С	15
Коэффициент эжекции	4
Площадь теплообменной поверхности холодоприемника, м ²	8
Коэффициент теплопередачи холодоприемника, Вт/м ² ·°С	92
Площадь теплообменной поверхности конденсатора, м ²	6
Коэффициент теплопередачи конденсатора, Вт/м ² ·°С	49
Хладагент	вода

В качестве объектов для производственной проверки предлагаемой инновационной технологии использовали микромицеты *Trichoderma harzianum F114* - продуцент фермента β-маннаназы и *Aspergillus awamori 2250*, который является продуцентом инулиназы.

Максимальная активность β-маннаназы достигалась при следующих параметрах культивирования [6]:

состав питательной среды, %:	
кукурузная мука	3,7
MgSO ₄	0,5
белково-витаминный комплекс	0,2
KH ₂ PO ₄	1,0
KCL	0,05
FeSO ₄	0,1
давление стерильного воздуха при подаче в ферментатор, МПа	0,04
частота вращения мешалки, с ⁻¹	3,5 – 3,6
pH жидкой фазы	4,0
температура культивирования, °C	32 ± 0,5
содержание СВ фильтрата культуральной жидкости, %	7,0 ± 0,5
активность β-маннаназы, ед/см ³	564 ± 3
продолжительность культивирования, ч	72

Параметры культивирования продуцента инулиназы были следующими [7]:

состав питательной среды, %:	
меласса	5,0
(NH ₄) ₂ HPO ₄	1,0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,05
KH ₂ PO ₄	0,1
давление стерильного воздуха при подаче в ферментатор, МПа	0,03
частота вращения мешалки, с ⁻¹	3,5 – 3,6
pH жидкой фазы	4,2
температура культивирования, °C	31 ± 0,5
содержание СВ фильтрата культуральной жидкости, %	7,0 ± 0,5
активность инулиназы, ед/см ³	25 ± 3
продолжительность культивирования, ч	96

Оценка энергоэффективности предлагаемой технологии базировалась на классической модели, предложенной Я. Шаргудом [8].

По Шаргуду эксергия – максимальная полезная работа, которая может быть получена, когда некоторое вещество переходит в состояние полного термодинамического равновесия с окружающей средой в результате обратимых процессов. Полная эксергия потока вещества (смеси веществ) может быть выражена уравнением:

$$\sum E_s = \sum E_g + \sum D, \quad (1)$$

где $\sum E_s$ – суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков; $\sum E_g$ – суммарная эксергия выводимых из контрольной поверхно-

сти полезных материальных и энергетических потоков; $\sum D = T_0 \cdot \Delta S$ – суммарные эксергетические потери, обусловленные диссипацией энергии при взаимодействии потока с окружающей средой.

Соотношение (1) для предлагаемой технологии [4, 9] рассматривалось в следующем виде:

$$E_1^n + E_2^n + E_3^n + \sum E_g^n = E_1^k + E_2^k + E_3^k + \sum D_i + \sum D_e, \quad (2)$$

где слагаемые этих уравнений – эксергия (кДж): посевного материала E_1^n ; питательной среды E_2^n ; стерильного воздуха E_3^n суммарной электроэнергии приводов оборудования $\sum E_g^n$; отработанного воздуха E_1^k ; осадка, идущего на кормовые цели E_2^k ; высушенного ферментного препарата E_3^k ; сумма потерь эксергии в результате необратимости процессов, происходящих внутри системы $\sum D_i$; сумма потерь эксергии во внешнюю среду $\sum D_e$.

Уравнение (2) отражает изменение эксергии биотехнологической системы за счет ввода посевного материала, питательной среды, стерильного воздуха, подвода электроэнергии к оборудованию; необратимых изменений структурно-механических свойств сырья, продуктов и вспомогательных потоков, сопряженных с затратами электроэнергии на приводы рабочих органов насосов, вентиляторов, мешалок и ТЭНов; покрытия потерь, возникающих вследствие необратимости физико-химических и биохимических процессов, протекающих при культивировании; компенсации потерь, обусловленных действием окружающей среды. Будем различать механическую, термическую и химическую составляющие эксергии.

Механическая эксергия потоков газообразных веществ представляет собой расширение от текущего давления до давления окружающей среды:

$$e_p = \frac{R}{M} T_0 \cdot \ln \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); M – молярная масса газа, кг/моль; T – температура окружающей среды, К; P, P₀ – давление газа в рассматриваемом потоке и в состоянии равновесия с окружающей средой, кПа.

При этом механическая составляющая эксергии суспензии, находящейся под давлением в трубопроводах, вычисляется пересчетом давле-

ния, создаваемого рециркуляционным насосом, с учетом расхода суспензии.

Термической составляющей эксергии обладают потоки, имеющие температуру выше принятой для окружающей среды (293,13 К). Удельную термическую эксергию вычисляют по уравнению Гюи-Столллы:

$$e_i = e - e_0 = h - h_0 - T_0(S - S_0), \quad (4)$$

где, e , e_0 , h , h_0 , S , S_0 - удельная термическая эксергия, кДж/кг, удельная энтальпия, кДж/кг и энтропия, кДж/(кг·К) продукта при текущих параметрах технологического процесса и в состоянии равновесия с окружающей средой.

Эксергию воздуха, участвующего в процессе сушки ферментного препарата, рассматривается как бинарная смесь, состоящая из 1 кг воздуха и X кг водяных паров:

$$e_a = \bar{c}_a \cdot (T - T_0) - \left(T_0 \cdot \bar{c}_a \cdot \ln \frac{T}{T_0} - R_a \cdot \ln \frac{p - \varphi \cdot p_s(T)}{p_0 - \varphi_0 \cdot p_s(T_0)} + X \cdot (h_n - h_n^0 - T_0 \cdot (S_n - S_n^0)) \right) \quad (5)$$

где \bar{c}_a - средняя удельная изобарная теплоемкость влажного воздуха между его текущим состоянием в потоке и состоянием равновесия с окружающей средой, кДж/(кг·К); p , p_0 и φ , φ_0 и, - полное давление, Па и относительная влажность воздуха, % в потоке и в окружающей среде; $p_s(T)$, $p_s(T_0)$ - давление насыщенного водяного пара при температуре потока и окружающей среды, Па; h_n , h_n^0 и S_n , S_n^0 - энтальпия и энтропия водяного пара при параметрах потока и окружающей среды, кДж/кг и кДж/(кг·К).

Молярная химическая эксергия вещества может быть вычислена в соответствии со следующей формулой:

$$\varepsilon_\mu = \Delta G^0 + \sum A_i \cdot \varepsilon_i, \quad (6)$$

где ΔG^0 - энергия Гиббса, относящаяся к образованию определяемого вещества в соответствии с реакцией его получения; A_i - коэффициенты при исходных веществах в уравнении реакции, ε_i - молярные эксергии исходных веществ, кДж/моль.

Составляющие эксергии различных потоков были неодинаковы. Механической эксергией характеризовались, прежде всего, потоки стерильного воздуха и пара. Химическая эксергия в заметных количествах присутствовала у посевного материала и питательной среды. Химическая эксергия суспензии вычислялась, исходя из химического состава содержащихся в ней мак-

ромолекул. Термическая эксергия в рассматриваемой биотехнологии представлена незначительно, в основном ее приращение происходит за счет приводов оборудования.

Для проведения эксергетического анализа рассматриваемая система была условно отделена от окружающей среды замкнутой поверхностью и, в свою очередь, разделена на ряд контрольных поверхностей (таблица 1).

Т а б л и ц а 1

Контрольные поверхности системы

№ п/п	Наименование контрольной поверхности
I	Инокулятор
II	Ферментер
III	Сбор культуры
IV	Фильтрация
V	Сушка
VI	Холодильная машина
VII	Парогенератор
VIII	Сбор конденсата
IX	Теплообмен

Схема обмена предлагаемой технологической системы тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой, а также между контрольными поверхностями представлена на рис. 2 Теплофизические свойства веществ, образующих материальные потоки, а также данные для вычисления химической эксергии взяты из справочной литературы [10, 11, 12, 13].

В работе рассмотрено влияние на систему внутренних D^i и внешних D^e эксергетических потерь.

В суммарное количество внутренних эксергетических потерь входят потери от конечной разности температур в результате рекуперативного теплообмена между суспензией и охлаждающим воздухом; электромеханические, возникающие при необратимом изменении структурно-механических свойств продукта; гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема воздуха и пара, а также внезапным снижением напора суспензии микроорганизмов при поступлении во внутреннюю полость оборудования.

Потери, обусловленные конечной разностью температур между потоками, определяют по формуле:

$$D^m \stackrel{=} {=} Q^m \cdot \bar{\tau}_e, \quad (7)$$

где Q^m - количество теплоты, переданное от одного потока к другому, кДж; $\bar{\tau}_e$ - среднее значение фактора Карно для двух взаимодействующих потоков.

Фактор Карно или эксергетическая температурная функция [14] равна термическому КПД цикла Карно между температурами контрольной поверхности и условно принятой окружающей среды:

$$\tau_e = (T_{кп} - T_0) / T_{кп}, \quad (8)$$

где $T_{кп}$ – температура теплоносителя внутри контрольной поверхности, К.

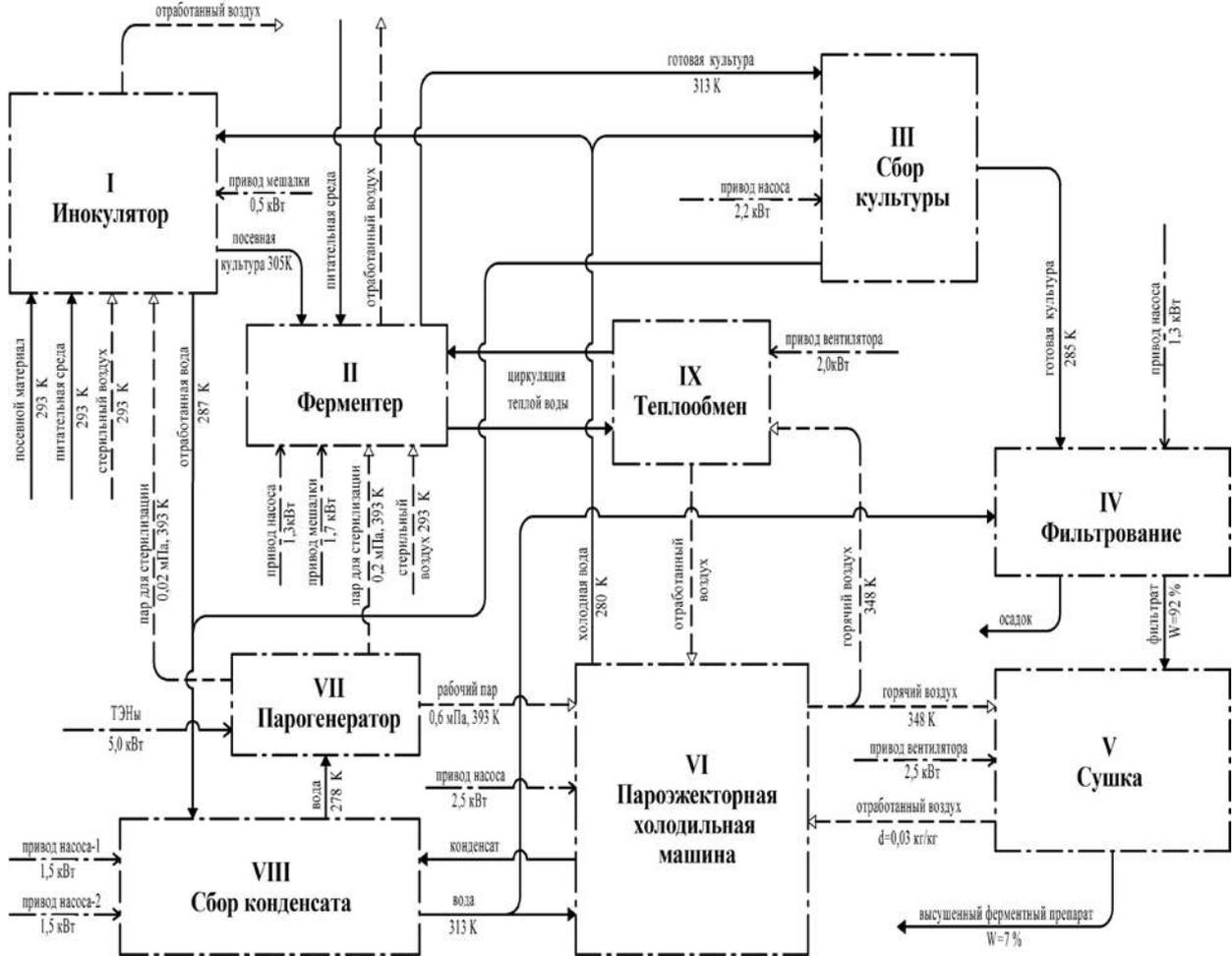


Рисунок 2 - Схема обмена потоками между контрольными поверхностями предлагаемой биотехнологической системы культивирования: \rightarrow – потоки жидкостей и коллоидных растворов; \dashrightarrow – газообразные потоки; \dashrightarrow – электроэнергия приводов оборудования; \cdots – границы контрольных поверхностей.

Эксергетические потери вследствие падения давления газов при их подаче в контрольную поверхность определяют по формуле:

$$D^2 = g \cdot \Delta H_z \cdot \frac{T_{кп}}{T_{вх}} \quad (9)$$

где $T_{вх}$ – температура, К теплоносителя на входе в контрольную поверхность; ΔH_z - гидравлические потери, м.

По формуле Дарси-Вейсбаха [13] найдены гидравлические потери при входе газов в контрольную поверхность:

$$\Delta H_z = \xi \cdot \frac{v_{вх}^2}{2g}, \quad (10)$$

где $v_{вх}$ – средняя скорость прохождения газа по сечению подводящего трубопровода, м/с; ξ – коэффициент сопротивления, определяемый отношением внутреннего объема оборудования, рассматриваемого в качестве контрольной поверхности, к поперечному сечению входного отверстия.

Электромеханические потери эксергии тождественны разности мощности приводов оборудования и приращения механической эксергии потока, перемещаемого данным оборудованием.

Внешние потери D^e связаны с условиями сопряжения системы с окружающей средой. Эти потери обусловлены отличием потенциалов потоков (температуры, давления, химического потенциала) внутри рассматриваемой системы от соответствующих значений в состоянии равновесия с окружающей средой, а также несовершенством изоляции оборудования.

Потери эксергии в окружающую среду, обусловленные несовершенством теплоизоляции, определены по формуле:

$$D^e = Q_{из} \cdot \tau_e, \quad (11)$$

где $Q_{из}$ – суммарные потери тепла в окружающую среду через контрольную поверхность, кДж; τ_e – фактор Карно.

Оценку термодинамического совершенства биотехнологической системы культивирования микроорганизмов проводили по эксергетическому КПД, исходя из значения эксергии высушенного ферментного препарата и осадка, состоящего из клеточной биомассы микроорганизмов и являющегося кормовым продуктом:

$$\eta_{экс} = \frac{\sum_{k=1}^l E_i^3}{\sum_{i=1}^n E_i^3} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^3 - \sum_{j=1}^m D_j}{\sum_{i=1}^n E_i^3}, \quad (12)$$

где $\sum_{k=1}^l e_i^3$ – суммарная удельная эксергия полезных потоков (готовой биомассы и осадка), кДж/кг; $\sum_{i=1}^n e_i^3$ – суммарная затраченная удельная эксергия (подведенная в систему извне), кДж/кг; $\sum_{j=1}^m D_j$ – суммарные эксергетические потери, кДж/кг.

Эксергия материальных и энергетических потоков, а также внутренние и внешние эксергетические потери, рассчитанные по формулам (7 – 11), составили эксергетический баланс биотехнологической системы культивирования аэробных микроорганизмов (таблица 2). При построении эксергетических диаграмм Грасмана-Шаргута (рисунок 3) в качестве абсо-

лютного эксергетического параметра выбрана удельная эксергия e , кДж/ч. Обозначение потоков на рисунке 3 представлено в таблице 2.

Полученный эксергетический КПД равен 24,02 %. Это говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы при использовании контуров рециркуляции.

Рациональное использование тепловой и электрической энергии в системе холодо- и теплоснабжения с применением парожеторной холодильной машины, работающей в режиме теплового насоса, рассматривалось с точки зрения снижения себестоимости получаемого целевого продукта. Основным принципиальным решением по снижению энергозатрат в предлагаемой технологии является оптимальный выбор перепадов температур в испарителе и конденсаторе парожеторной холодильной машины при получении «холодной» и «теплой» воды. Отклонение от этих значений неизбежно приведет к увеличению потребляемой энергии: понижение температуры кипения хладагента в испарителе на 1 °С приведет к необходимости увеличения расхода рабочего пара в эжектор, а, следовательно, к перерасходу энергии на 5-7 %; а повышение температуры конденсации на 1 °С приведет к увеличению расхода энергии на 2,0-2,5 % [15].

Предлагаемая технология получения ферментных препаратов с применением парожеторной холодильной машины расширяет границы энергоэффективного сопряжения объектов различных температурных потенциалов на основе утилизации и рекуперации вторичных энергоресурсов. При этом в полной мере реализован универсальный подход в создании конкурентоспособной технологии, обеспечивающей выработку тепла и холода для совместно протекающих процессов подготовки жидкой посевной культуры в инокуляторе, непосредственного выращивания культуры микроорганизмов в ферментере, охлаждения готовой культуры в приемных сборниках и получения порошкообразного ферментного препарата с однородным гранулометрическим составом в распылительной сушилке.

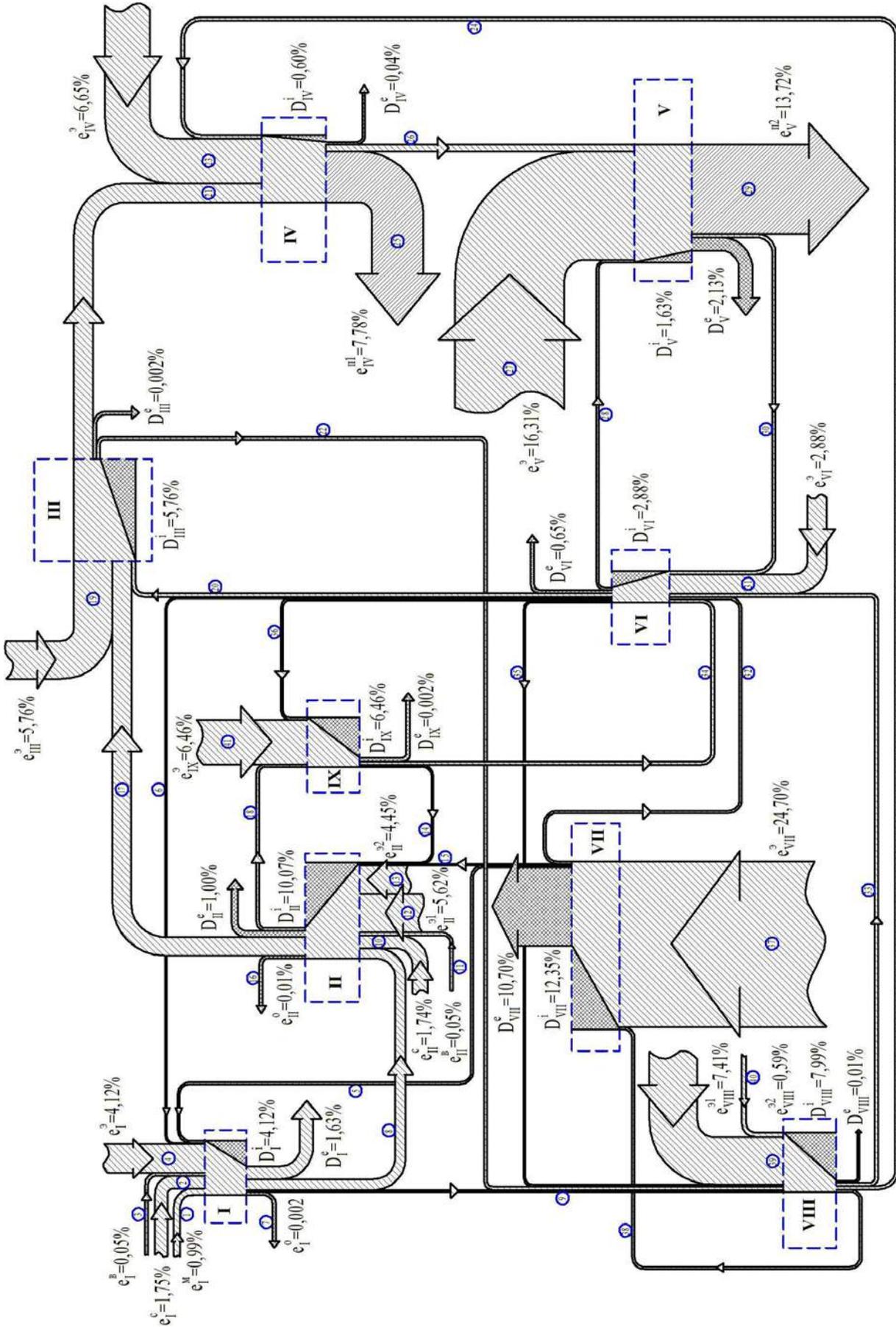


Рисунок 3 - Диаграмма Грассмана-Шаргута

Обозначения потоков на диаграмме Грассмана-Шаргута

№ потока	Наименование потока	№ потока	Наименование потока
1	Инокулят	10	Охлаждающий воздух
2	Суспензия на выходе из ФБР	11	Отработанный воздух
3	Пена суспензии	12	Кислород
4	Возврат суспензии	13	Электроэнергия лампы Osram
5	Готовая суспензия	14	Электроэнергия ламп ДНаТ
6	Циркулирующая суспензия	15	Привод компрессора
7	Свежий углекислый газ	16	Привод насоса-пеногасителя
8	Исходная газовоздушная смесь	17	Привод циркуляционного насоса
9	Отработанная газовоздушная смесь	18	Привод вентилятора
		19	Привод воздухоохладителя

Таким образом, предлагаемая технология имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными способами производства ферментных препаратов:

- позволяет снизить удельные энергозатраты за счет включения инокулятора, ферментера, сборников готовой культуры в тепловую схему производства с использованием парожекторной холодильной машины, работающей в режиме теплового насоса;

- обеспечивает повышение энергетической эффективности процесса ферментации за счет использования теплоты конденсации хладагента в конденсаторе холодильной машины при нагревании воды с последующей ее подачей в греющую рубашку ферментера и потенциала хладагента в холодоприемнике при охлаждении воды с последующей подачей в охлаждающую рубашку инокулятора и систему охлаждения приемных сборников готовой культуры;

- повышает экологическую безопасность реализации технологии за счет применения воды в качестве хладагента, исключая использование токсичных, взрыво- и пожароопасных рабочих сред, а также за счет организации замкнутых рециркуляционных схем по материальным и энергетическим потокам со значительным снижением отвода вторичных энерго-ресурсов из схемы тепло- и холодоснабжения;

- обеспечивает реальные условия утилизации пара низкого давления;

- позволяет обеспечить расход электроэнергии только на работу органов управления, насосов хладагента и воды, теплогревателей элементов парогенератора.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным

направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по Государственному контракту № 14.512.11.0078 от 20.06.2013 года на оборудовании ЦКП "КУЭП".

ЛИТЕРАТУРА

1 Кафаров, В.В. Моделирование биохимических реакторов [Текст] / В.В. Кафаров, А.Ю. Викарев, Л.С. Гордеев. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 344 с.

2 Патент № 2484129 Способ производства биомассы аэробных микроорганизмов [Текст] / О.С. Корнеева, А.А. Шевцов, И.В. Черемушкина и др. - Заявл. 10.06.2013, Бюл. № 16

3 Шевцов, А.А Математическое обеспечение процесса культивирования микроводоросли *Spirulina* в фотобиореакторе пленочного типа [Текст] / А.А.Шевцов, А.В. Дранников, Н.Ю. Ситников и др. // Биотехнология. – 2013. – № 2. – С. 87 – 94.

4 Шевцов, А.А. Управление энергоэффективной биотехнологией получения ферментных препаратов на базе пароконпресссионного теплового насоса [Текст] / А.А.Шевцов, И.В. Мажулина // Автоматизация и современные технологии – 2013. - № 7. – С. 9 – 13.

5 Заявка на изобретение № 2012147129 Способ получения порошкообразных ферментных препаратов [Текст] / А.А. Шевцов, И.В. Черемушкина, А.И. Ключников и др. – Заявл. 07.11.2012.

6 Черемушкина, И.В Оптимизация условий биосинтеза β -маннаназы грибного происхождения [Текст] / И.В. Черемушкина, Н.А Некрасова, С.Н. Черняева и др. // Вестник ВГУИТ. – 2013. - № 2. – С. 206-210.

7 Шевцов, А.А. Использование инулиназы в производстве диетических продуктов питания [Текст] / А.А. Шевцов, И.В. Тертычная, Т.Н. Тертычная // Материалы международной научно-практической конференции «Состояние, проблемы и перспективы производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Уфа. - 2011. - С. 355-357.

8 Шаргут, Я. Эксергия [Текст] / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 284 с.

9 Патент 2480520 Способ управления процессами получения и сушки ферментных препаратов [Текст] / А.А. Шевцов, И.В. Мажулина, Т.Н. Тертычная. – Заявл. 27.04.2013, Бюл. № 12.

10 Богословский, С.В. Физические свойства газов и жидкостей [Текст] / С.В. Богословский. – СПб.: СПбГУАП, 2001. – 73 с.

11 Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

12 Янговский, Е.И. Потоки энергии и эксергии [Текст] / Е.И. Янговский. – М.: Наука, 1988. – 144 с.

13 Мревлиашвили, Г.М. Низкотемпературная калориметрия биологических макромолекул [Текст] / Г.М. Мревлиашвили // Успехи физических наук. – 1979. – Т. 128. - № 2. – С. 273-312.

14 Озаренко, О.А. Моделирование процессов периодического культивирования микроорганизмов [Текст]: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.23. - Щелково, 2004. - 111 с.

15 Бамбушек, Е.М. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин [Текст] / Е.М. Бамбушек, Н. Н. Бухарин, Е. Д. Герасимов и др. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. - 423 с.

REFERENCES

1 Kafarov, V.V. Modeling of biochemical reactors [Text] / V.V. Kafarov, A.U. Vicarev, L.S. Gordeev. - M.: Lesnaya promyshlennost, 1979. - 344 p.

2 Patent 2484129 Process for producing biomass aerobic microorganisms [Text] / O.S. Korneeva, A.A. Shevtsov, I.V. Cheremushkina et al. - Appl. 10.06.2013, Bull. № 16.

3 Shevtsov, A.A. Mathematical software process Spirulina microalgae cultivation in photobioreactor film type [Text] / A.A. Shevtsov,

A.V. Drannikov, N.Y. Sitnikov et al // Biotechnology. - 2013. - № 2. - P. 87 - 94.

4 Shevtsov, A.A. Managing energy efficiency biotechnology obtain enzyme preparations on the basis of vapor compression heat pump [Text] / A.A. Shevtsov, I.V. Mazhulina // Automation and modern technology. - 2013. - № 7. - P. 9 - 13.

5 Patent 2012147129 A process for preparing powdered enzyme preparations [Text] / A.A. Shevtsov, I.V. Cheremushkina, A.I. Kluchnikov et al. - Appl. 07.11.2012.

6 Cheremushkina, I.V. Optimization of the biosynthesis of β -mannanase of fungal origin [Text] / I.V. Cheremushkina, N.A. Nekrasova, S.N. Chernyaeva et al // Bulletin of VSUET. - 2013. - № 2. - P. 206-210.

7 Shevtsov, A.A. The use of inulinase in the production of dietary foods [Text] / A.A. Shevtsov, I.V. Tertychnaya, T.N. Tertychnaya // International scientific-practical conference "The status, problems and prospects of production and processing of agricultural products", Ufa. - 2011. - P. 355-357.

8 Shargut, J. Exergy [Text] / J. Shargut, R. Petela. – М.: Energiya, 1968. - 284 p.

9 Patent 2480520 Method of controlling the processes of obtaining and dry enzyme preparations [Text] / A.A. Shevtsov, I.V. Mazhulina, T.N. Tertychnaya. - Appl. 27.04.2013, Bull. №12.

10 Bogoslovski, S.V. The physical properties of gases and liquids [Text] / S.V. Bogoslovski. - SPb.: SPbSUAI, 2001. - 73 p.

11 Vargaftik, N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids [Text] / N.B. Vargaftik. – М.: Nauka, 1972. - 720 p.

12 Yantovsky, E.I. Flows of energy and exergy [Text] / E.I. Yantovsky. – М.: Nauka, 1988. - 144 p.

13 Mrevliashvili, G.M. Low-temperature calorimetry of biological macromolecules [Text] / G.M. Mrevliashvili // Successes of physical sciences. - 1979. - V. 128. - № 2. - P. 273-312.

14 Ozarenko, O.A. Modeling of processes - batch culture of micro-organisms [Text]: dis. ... PhD: 03.00.23. - Schyolkovo, 2004. - 111 p.

15 Bambushek, E.M. Thermal and structural calculations chillers [Text] / E.M. Bambushek, N.N. Bukharin, E.D. Gerasimov et al. - L.: Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie, 1987. - 423 p.