



УДК 629.025: 629.069.

**Д.С. Мизгирев**, к.т.н., доцент кафедры ТКМ и МР ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
**А.С. Курников**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой ТКМ и МР ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СИСТЕМ СКПО РЕЧНОГО ФЛОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

*Ключевые слова:* суда комплексной переработки отходов, СКПО, возобновляемые источники энергии, проектирование СКПО, методика расчета систем перерабатывающего комплекса СКПО.

*В статье рассматривается методика проектирования комплекса систем СКПО речного флота с использованием возобновляемой энергии. Судовые отходы и продукты их переработки рассмотрены с точки зрения их использования в качестве источников возобновляемой энергии. Приведена структура СКПО, математические модели систем перерабатывающего комплекса, методика расчета комплекса взаимодействующих систем СКПО.*

Водные ресурсы — самый уязвимый в отношении антропогенного влияния компонент окружающей среды. До 2/3 поверхностных вод России уже не отвечает нормативным требованиям, особенно в Европейской ее части.

В настоящее время на флоте преимущественно применяются два способа решения проблемы отходов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Первым является раздельное накопление всех их видов для сдачи на берег. Недостатком является необходимость наличия на борту емкостей, что требует дополнительных помещений и уменьшает провозную способность, а также развитой инфраструктуры комплексного обслуживания флота (КОФ). Как вариант, можно выделить раздельное накопление всех видов отходов для сдачи на специальные суда комплексной переработки отходов (СКПО). Вторым — переработка отходов на борту судна при помощи специальных систем для очистки сточных (СВ) и нефтесодержащих (НВ) вод, а также инсинераторов. К недостаткам способа относятся: сложность и дороговизна оборудования, его обслуживания, необходимость дополнительных затрат энергии. Для ряда речных судов установка указанного оборудования на борту невозможна.

Указанные недостатки существующей системы КОФ и систем переработки отдельных видов отходов, а также учет результатов анализа регламентирующей документации к природоохранной деятельности на водном транспорте явились поводом для поиска новых подходов к комплексному решению проблемы судовых отходов.

Также необходимо учитывать то обстоятельство, что большинство судовых отходов являются возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) и использование теплоты, выделяющейся при их сгорании (см. табл. 1) до сих пор не получило широкого применения.

Таблица 1 – Энергетические показатели основных видов судовых отходов

Вид отходов	Продукт переработки	Средневероятностная удельная теплота сгорания $Q_p^*$ , кДж/кг
СВ и пищевые отходы	Биогаз	24 310
	Органический сток метантенка	13 866
НВ	Обезвоженный нефтепродукт	42 882
Сухой мусор	Твердое топливо	18 255

Проведенный анализ работ различных российских и зарубежных ученых показывает, что разработки и исследования, проводимые ими, ориентированы не на решение общей проблемы проектирования систем для утилизации отходов, а на частные вопросы. Дальнейшее решение проблемы сдерживается отсутствием комплексных исследований систем переработки различных видов отходов при их взаимодействии в целях получения возобновляемой энергии.

Для этого необходим комплексный метод проектирования судовых систем, который позволяет производить эффективную переработку и утилизацию основных видов отходов для получения максимальной возобновляемой энергии с одновременным уменьшением антропогенной нагрузки на окружающую среду. Таким образом, проблема проектирования подобных судовых систем для переработки и утилизации судовых отходов актуальна и требует скорейшего разрешения.

Для переработки и утилизации основных видов отходов разработаны технологические процессы систем очистки СВ и НВ (СОСНВ), обработки балластных вод (СОБВ), обезвреживания пищевых отходов и осадка СВ, переработки сухого мусора, утилизации сжигаемых отходов в автономном паровом котлоагрегате, а также система очистки газовых выбросов котлоагрегата и вспомогательных ДВС (СОГ) с применением циклонно-пенного аппарата (ЦПА).

Выбранные технологии позволяют при соответствующем техническом обеспечении разработать судовой комплекс, общая функциональная схема которого изображена на рис. 1.

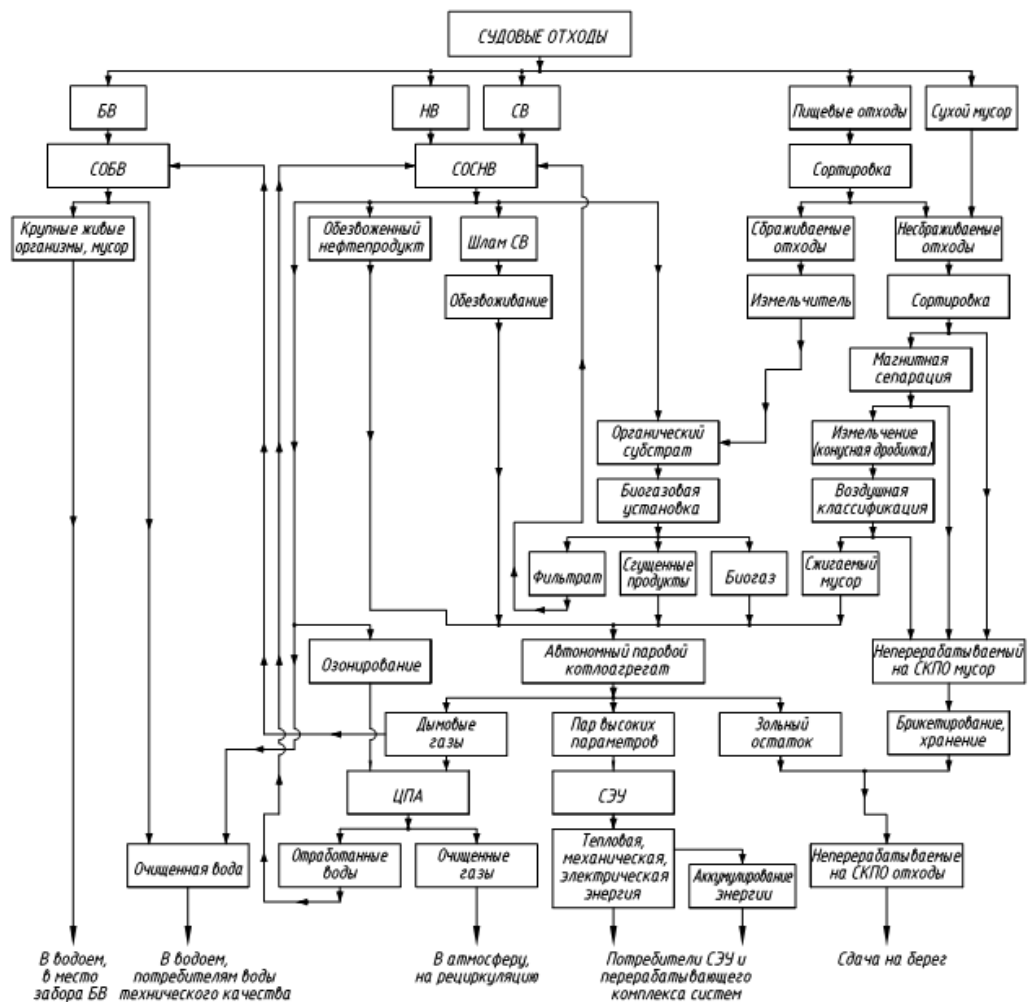


Рисунок 1 – Общая функциональная схема СКПО

Переработка судовых отходов будет осуществляться по выбранным технологиям в соответствии с общей структурной схемой, представленной на рис. 2. Принимаемые на переработку, а также собственные отходы СКПО поступают на специальный комплекс, состоящий из отдельных систем переработки по видам отходов и вспомогательного оборудования. В результате образуются: очищенная вода, поступающая непосредственно в водоем, либо потребителям воды технического качества; горючие вещества; неперерабатываемые на СКПО отходы, сдаваемые на дальнейшую утилизацию на береговые комбинаты. Получаемые ВИЭ используются в судовой энергетической установке (СЭУ) судна для генерации тепловой, механической и электрической энергий.

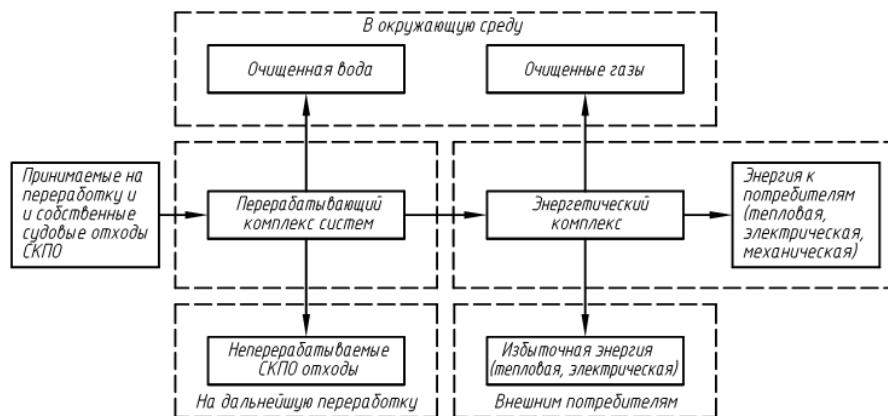


Рисунок 2 – Общая структурная схема СКПО

Поскольку СКПО представляет собой комплекс систем, состоящих из ряда устройств и реакторов, то в общем случае математическое описание включает в себя уравнения материального, энергетического и теплового балансов

Основные материальные взаимоотношения систем приведены на рис. 3.

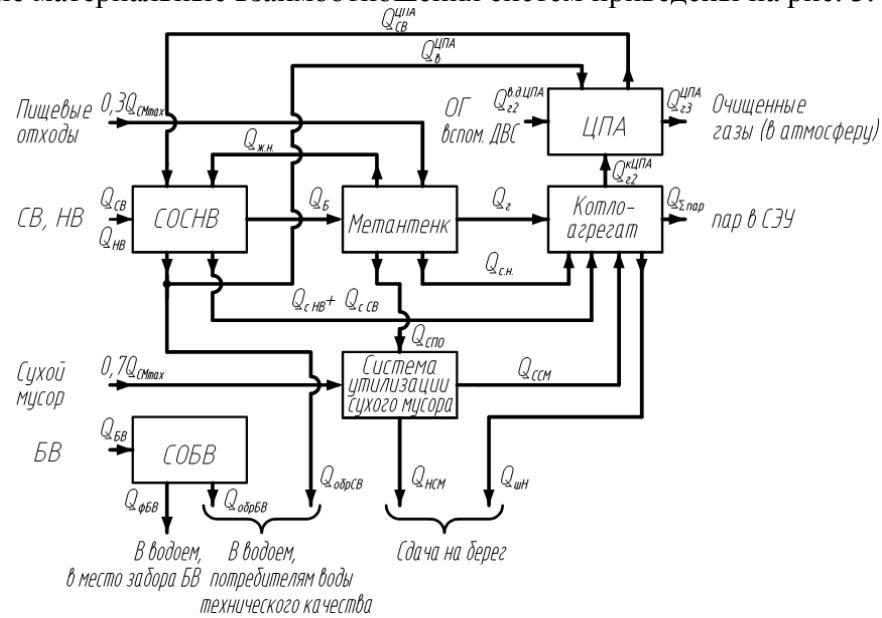


Рисунок 3 – Материальные взаимоотношения систем СКПО

Система уравнений балансов жидкостей и газов имеет вид:

$$\begin{cases} Q_{св} + Q_{нв} = Q_{обр.св} + Q_{в}^{цпа} + Q_{б} + Q_{с.св} + Q_{с.нв} - Q_{св}^{цпа} - Q_{ж.н.}; \\ Q_{бв} = Q_{ф.бв} + Q_{обр.бв}; Q_{см\ max} = Q_{нсм} + Q_{спо} + Q_{ссм} + [Q_{сух}]_{см}; \\ Q_{шн} = Q_{ш.ссм} + Q_{ш.н.}; Q_{г.д.цпа} = Q_{г.д.цпа}^{кцпа} + Q_{г.д.цпа}^{в.д.цпа}, \end{cases} \quad (1)$$

- где  $Q_{св}$  - количество поступающих на переработку СВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{нв}$  - количество поступающих на переработку НВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{обр.св}$  - количество очищенных в СОСНВ СВ и НВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{в}^{цпа}$  - количество воды, поступающей на пополнение в ЦПА, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{б}$  - производительность биогазовой установки по СВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{с.св}$  - количество подлежащих сжиганию шламов СВ СОСНВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{с.нв}$  - количество подлежащих сжиганию шламов НВ СОСНВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{св}^{цпа}$  - количество воды, отводимой в цистерну СВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{ж.н.}$  - количество жидких несбраживаемых стоков из метантенка, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{бв}$  - количество БВ, поступающих на обработку в СОБВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{ф.бв}$  - количество крупнодисперсных фракций БВ, удаляемых при первичном заборе воды, т/ч;  
 $Q_{обр.бв}$  - количество очищенных в СОБВ БВ, м<sup>3</sup>/ч;  
 $Q_{см\ max}$  - максимальная масса сухих принимаемых отходов, т/ч;  
 $Q_{нсм}$  - количество неперерабатываемого СКПО сухого мусора, т/ч;  
 $Q_{спо}$  - количество несбраживаемых фракций пищевых отходов, отделяемых при сортировке, т/ч;  
 $Q_{ссм}$  - количество сжигаемого в котлоагрегате отсортированного мусора, т/ч;  
 $[Q_{сух}]_{см}$  - расход сухого вещества осадка метантенка от пищевых отходов, т/ч;  
 $Q_{шн}$  - количество зольного остатка от сжигания всех видов отходов, т/ч;  
 $Q_{ш.ссм}$  - количество зольного остатка от сжигания отсортированного мусора, т/ч;  
 $Q_{ш.н.}$  - количество зольного остатка от сжигания обезвоженного шлама биогазовой установки, т/ч;  
 $Q_{г.д.цпа}$  - массовый расход очищенных в ЦПА газов, кг/с;  
 $Q_{г.д.цпа}^{кцпа}$  - массовый расход поступающих в ЦПА ДГ от котлоагрегата, кг/с;  
 $Q_{г.д.цпа}^{в.д.цпа}$  - массовый расход поступающих в ЦПА отработавших газов (ОГ) от вспомогательных ДВС, кг/с.

Уравнение теплового баланса СКПО определяется из соотношения потребляемых и получаемых количеств теплоты в СЭУ и системах судна:

$$75,925 \cdot Q_{\text{пар}0} \cdot N_{\text{егд}} + \frac{148,888 \cdot N_{\text{егг}}^2}{N_{\text{егд}}} + 0,013 \cdot Q_{\text{св}} + 0,038 \cdot Q_{\text{см max}} + 85,259 \cdot 10^{-3} \cdot F_{\text{MT}} + \quad (2)$$

$$+ 24 \cdot Q_{\text{от}}^{6.0} \cdot N_e^{6.0} \cdot Q_{\text{нт}}^p = 51729 \cdot Q_{\text{св}} + 899210 \cdot Q_{\text{см max}} + 100699,5 \cdot Q_{\text{HB}} + 10^{-3} \cdot m_T \cdot Q_{\text{нт}}^p,$$

- где  $Q_{\text{пар}0}$  - удельный расход пара главным двигателем, кг/(кВт·ч);  
 $N_{\text{егд}}, N_{\text{егг}}, N_e^{6.0}$  - мощность главного двигателя, мощность на клеммах электрогенератора, мощность вспомогательных ДВС соответственно, кВт;  
 $F_{\text{MT}}$  - площадь ограждающих стенок метантенка, м<sup>2</sup>;  
 $Q_{\Sigma T}^{6.0}$  - количество теплоты, потребляемое вспомогательными ДВС, кДж/сут;  
 $Q_{\text{нт}}^p$  - удельная теплота сгорания дополнительного топлива, кДж/кг;  
 $m_T$  - суточный расход дополнительного топлива, т/сут.

Практически все судовые системы являются гидравлическими комплексами и составлены из типовых участков. Энергетический баланс, справедливый для газов, жидкостей и их смесей применительно к этим участкам выражается в виде системы уравнений, учитывающей характеристики насосов, струйных аппаратов, трубопроводов, реакторов, цистерн и систем их газоотвода, а также посадку судна:

$$\begin{cases} H_{\text{жс}i}^{\text{II}} = \frac{P_{i,i+1} - P_{i,i-1}}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + \frac{P_{\text{с}i}}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + \frac{v_{i,i+1}^2 - v_{i,i-1}^2}{2 \cdot g} + H_{i,i+1} - H_{i-1,i} + \Delta h_i + \Delta h_{\text{в}i} + R_i \cdot Q_{\text{жс}i}^2 + R_{\text{см}i} \cdot Q_{\text{см}i}^2 + J_i; \\ H_{\text{с}i}^{\text{II}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{\rho_2 \cdot g} + \sum_{i=1}^n (R_{\text{с}i} \cdot Q_{\text{с}i}^2); R_i = \left( \lambda_i \frac{l_i}{D_i} + \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 D_i^4 g}, \end{cases} \quad (3)$$

- где  $H_{\text{жс}i}^{\text{II}}, H_{\text{с}i}^{\text{II}}$  - потребные напоры насосов (компрессоров) на  $i$ -том участке, м;  
 $P_{i,i+1}, P_{i,i-1}$  - давление над поверхностью жидкости в цистернах, расположенных между  $i$ -тым и  $(i+1)$ ,  $i$ -тым и  $(i-1)$  участками соответственно, определяющее параметры системы газоотвода, Па;  
 $P_{\text{с}i}$  - давление в приемной камере струйного аппарата  $i$ -того участка, Па;  
 $\Delta p_i$  - перепад давлений на  $i$ -том участке, Па;  
 $v_{i,i+1}, v_{i,i-1}$  - скорость жидкости относительно стенок элементов соседних участков, м/с;  
 $H_{i,i+1}, H_{i-1,i}$  - уровни жидкости в цистернах, расположенных между соответствующими участками относительно насосов этих участков, м;  
 $\Delta h_i$  - разность между отстояниями от днища всасывающего патрубка насоса и отверстия для подачи жидкости в цистерну при посадке судна на ровный киль, м;  
 $\Delta h_{\text{в}i}$  - поправка на посадку судна для высоты  $\Delta h_i$  (определяется конструктивно), м;  
 $R_i, R_{\text{см}i}$  - обобщенное сопротивление трубопроводов до и после струйного аппарата на  $i$ -том участке системы соответственно, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;  
 $R_{\text{с}i}$  - обобщенное сопротивление газоходов на  $i$ -том участке системы, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;  
 $Q_{\text{жс}i}, Q_{\text{с}i}, Q_{\text{см}i}$  - объемные скорости жидкости, газа и смеси соответственно на  $i$ -том участке, м<sup>3</sup>/с;  
 $\rho_{\text{ж}}, \rho_2$  - плотность жидкости и газа соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  
 $J_i$  - инерционный член, учитывающий потери напора вследствие нестационарности движения жидкости на  $i$ -том участке (определяется конструкцией элемента и режимом течения жидкости), Па;  
 $\lambda_i$  - коэффициент сопротивления трения на  $i$ -том участке трубопровода;  
 $l_i$  - длина  $i$ -того участка, м;  
 $D_i$  - диаметр трубопровода на  $i$ -том участке, м;  
 $\Sigma \xi_i$  - сумма коэффициентов местных сопротивлений на  $i$ -том участке трубопровода.

Проведенные исследования позволили определить все неизвестные величины и зависимости в уравнениях математического описания работы систем переработки судовых отходов. Основой моделей является сочетание гидродинамических, физических и химических процессов, происходящих в системах.

Математическая модель СОСНВ (рис. 4) включает в себя модели СОНВ и СОСВ и состоит из системы 30 уравнений, по которой можно при проектировании определить ее основные характеристики:

1. Уравнение, выражающее необходимую производительность объединенной СОСНВ:

$$Q_{СОСНВ} = Q_{СВ} + Q_{НВ} = Q_{обрСВ} + Q_{\text{ШПА}} + Q_{Б} + Q_{сСВ} + Q_{сНВ} - Q_{\text{ШПА}} - Q_{\text{жсн}}. \quad (4)$$

Математическую модель очистки НВ в СОСНВ составляют:

2. Выражения, отражающие работу трехпродуктового гидроциклона разделения НВ:

$$Q_{\text{сц1}} = Q_{\text{сц2}} + Q_{\text{сц3}} + Q_{\text{сц4}}; \quad \frac{Q_{\text{сц2}}}{Q_{\text{сц3}} + Q_{\text{сц4}}} = 1,4 \frac{F_2}{F_3 + F_4}; \quad \frac{Q_{\text{сц3}}}{Q_{\text{сц4}}} = 1,4 \frac{F_3}{F_4}; \quad \frac{Q_{\text{сц2}}}{Q_{\text{сц4}}} = 1,4 \frac{F_2}{F_4};$$

$$P_{\text{сц2}}^{-0,0404} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} \cdot (D'_{\text{вх}})^{1,285} \cdot (D'_6)^{0,4645} \cdot (D'_n)^{0,4645} \cdot (L'_{\text{сц}})^{0,1258} \cdot P_{\text{сц1}}^{0,491}}{Q_{\text{сц4}} \cdot (D'_{\text{сц}})^{-0,257}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{сц2}}, Q_{\text{сц3}}, Q_{\text{сц4}}$  - объемные скорости через нижний, верхний и центральный сливы, м<sup>3</sup>/с;

$F_2, F_3, F_4$  - площади поперечных сечений верхнего, нижнего и центрального сливных отверстий соответственно, м<sup>2</sup>;

$P_{\text{сц1}}, P_{\text{сц2}}$  - давления на входе в гидроциклон и на выходе из центрального патрубка, кПа;

$D'_{\text{вх}}, D'_6, D'_n, D'_{\text{сц}}$  - диаметр входного отверстия, верхнего и нижнего сливов, цилиндрической части соответственно, м;

$L'_{\text{сц}}$  - высота аппарата, м;

3. Уравнения, описывающие параметры отстойников НВ:

$$D_{\text{ОНВ1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{НВ}}}{\pi \cdot v_0}}; \quad D_{\text{ОНВ2}} = D_{\text{ОНВ1}} \cdot \sqrt{2}, \quad (6)$$

где  $D_{\text{ОНВ1}}$  - диаметр струнаправляющей перегородки отстойника НВ, м;

$D_{\text{ОНВ2}}$  - диаметр отстойника НВ, м;

$v_0$  - скорость входа НВ в рабочую зону, м/с.

Математическая модель очистки СВ в СОСНВ представлена выражениями:

4. Уравнения, описывающие параметры отстойников СВ:

$$D_{\text{О1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{СВ}}}{\pi \cdot v_0}}; \quad D_{\text{О2}} = D_{\text{О1}} \cdot \sqrt{2}, \quad (7)$$

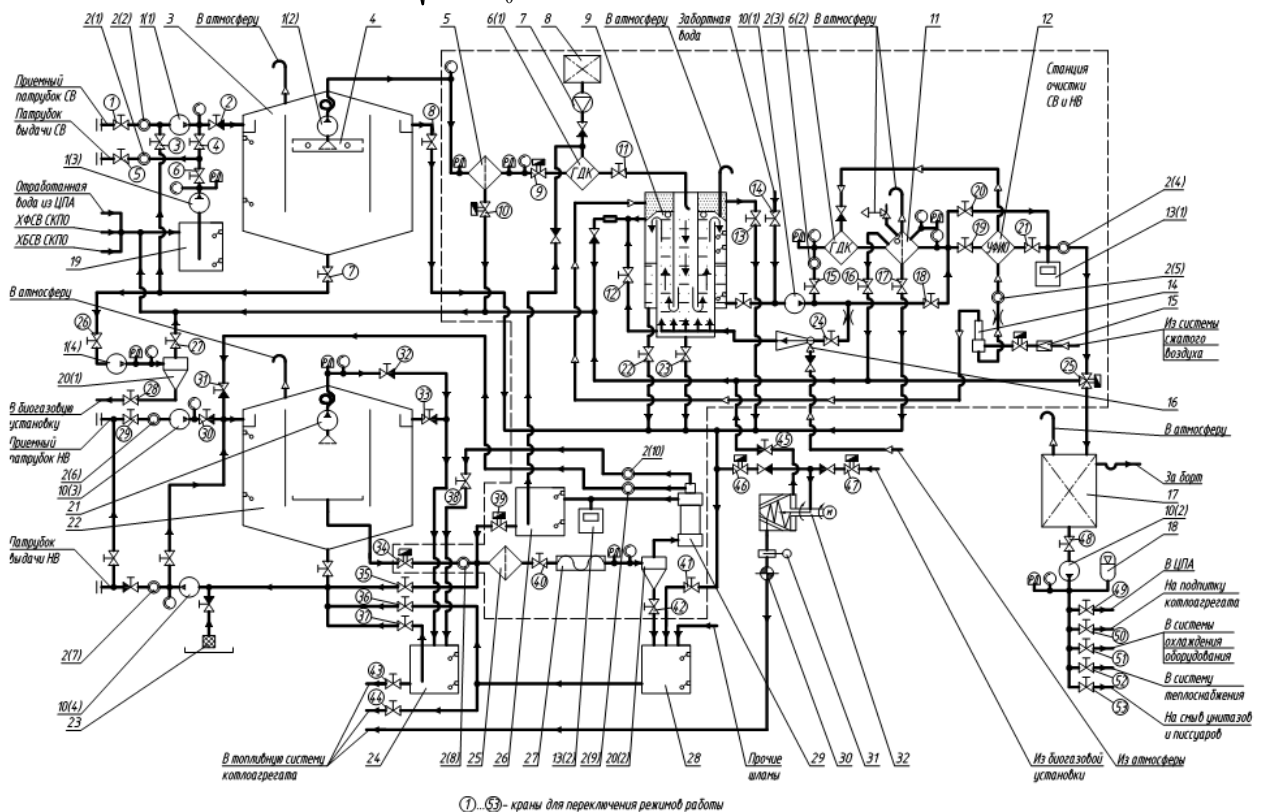


Рисунок 4 – Принципиальная схема СОСНВ:

1(1)...1(4) – насос фекальный; 2(1)...2(10) – расходомер; 3 – танк-отстойник СВ; 4 – устройство приемное; 5 – фильтр самоочищающийся; 6(1)...6(2) – кавитатор гидродинамический; 7 – насос-дозатор; 8 – расходный бак коагулянта; 9 – коагулятор-флокатор; 10(1)...10(4) – насос центробежный; 11 – фильтр

контактный; 12 – УФИО; 13(1)...13(2) – прибор САЗРИУС; 14 – труба вихревая; 15 – клапан редукционный; 16 – эжектор; 17 – танк воды технического качества; 18 – гидрофор; 19 – танк СВ СКПО; 20(1)...20(2) – гидроциклон; 21 – скиммер; 22 – танк-отстойник НВ; 23 – приемник подсланевых вод СКПО; 24 – танк обезвоженных нефтепродуктов; 25 – фильтр сетчатый; 26 – танк очищенных НВ; 27 – насос винтовой; 28 – танк шламовый; 29 – гидроциклон трехпродуктовый; 30 – питатель винтовой; 31 – шибер; 32 – обезвоживатель осадка

где  $D_{O1}$  – диаметр струенаправляющей перегородки отстойника СВ, м;

$D_{O2}$  – диаметр отстойника СВ, м;

$U_0$  – скорость входа СВ в рабочую зону, м/с.

5. Система выражений, определяющих основные параметры кавитаторов:

$$D_2 = 102,72 \sqrt{\frac{Q_p}{\sqrt{(p_1 - p_3) \cdot \rho}}}; \quad D_4 = 2 \cdot D_2; \quad \Delta p = p_1 - p_3; \quad (8)$$

$$p_3 = -209,8 + 0,779 \cdot e + 0,9 \cdot l + 1,795 \cdot \Delta p + 64,014 \cdot F_4 / F_2 + 0,305 \cdot e \cdot \Delta p - 2,696 \cdot l \cdot F_4 / F_2 - 0,446 \cdot \Delta p \cdot F_4 / F_2;$$

$$l = 1,6457 + 0,0788 \cdot e + 0,0101 \cdot \Delta p + 0,032 \cdot e \cdot \Delta p; \quad Q_3 = 0,1 \cdot Q_p.$$

6. Уравнения, описывающие коагулятор-флотатор:

$$D_{кко}' = 0,282 \cdot \sqrt{Q_{СОСВ}}; \quad D_{\phi}' = 0,567 \sqrt{Q_{СОСВ}}; \quad D_{кф}' = 0,711 \cdot \sqrt{Q_{СОСВ}}, \quad (9)$$

где  $Q_{СОСВ}$  – производительность СОСВ, м<sup>3</sup>/ч;

$D_{кко}'$ ,  $D_{\phi}'$ ,  $D_{кф}'$  – диаметр коагулятора, флотатора, камеры чистой воды, м;

7. Уравнение, определяющее производительность УФИО по озону:

$$Q_{O_3} = C_{O_3,уф} \cdot Q_{г,уф}, \quad (10)$$

где  $Q_{г,уф}$  – объемная скорость газа в кольцевом промежутке, м<sup>3</sup>/с;

$C_{O_3,уф}$  – концентрация озона в озоновоздушной смеси, г/м<sup>3</sup>.

8. Выражения, определяющие параметры контактного фильтра:

$$D_{кк} = \sqrt{\frac{4Q_{СОСВ} (3 \cdot \tau_{кв} \cdot \omega_{фк} - H_{фк})}{3\pi H_{фк} \omega_{фк}}}; \quad D_{фк} = \sqrt{\frac{4Q_{СОСВ}}{\pi \omega_{фк}} + D_{кк}^2}, \quad (11)$$

где  $D_{кк}$ ,  $D_{фк}$  – минимально необходимый диаметр контактной колонны и контактного фильтра соответственно, м;

$\tau_{кв}$  – регламентированное время контакта озона с водой, с;

$\omega_{фк}$  – скорость фильтрования, м/с;

$H_{фк}$  – высота контактного фильтра, м.

9. Уравнения, описывающие обработку воды УФИ:

$$J = - \frac{Q_{СОСВ} \cdot \beta \cdot r \cdot \lg(B_{уф}/B_0)}{1055,3}; \quad g_{уф} = \frac{J \cdot \tau}{F_{уф}} \geq [g_{уф}], \quad (12)$$

где  $J$  – величина бактерицидного потока, Вт;

$Q_{ж}$  – объемная скорость обрабатываемой воды, м<sup>3</sup>/ч;

$\beta$  – коэффициент поглощения облучаемой воды, см<sup>-1</sup>;

$r$  – коэффициент сопротивления облучаемых бактерий;

$B_0, B_{уф}$  – коли-индекс до и после облучения соответственно, шт/дм<sup>3</sup>;

$g_{уф}$  – доза облучения, мДж/см<sup>2</sup>;

$\tau$  – время контакта воды с бактерицидными лучами, с;

$F_{уф}$  – площадь поверхности цилиндра, размещенного в середине реакционного пространства, м<sup>2</sup>;

$[g_{уф}]$  – минимально допустимая доза облучения, мДж/см<sup>2</sup>.

10. Выражения, отражающие работу блока подготовки воздуха (БПВ) УФИО:

$$F_c = 263 \cdot \frac{Q_{O_3} \cdot T_{mp}^{0,5} \cdot 10^2}{P_{mp}}; \quad A = 0,18 \left[ 1 - \left( \frac{100}{P_{mp}} \right)^{0,29} \right]; \quad \Delta t_x = A \cdot T_{mp}, \quad (13)$$

где  $F_c$  – площади поперечного сечения сопла, м<sup>2</sup>;

$T_{mp}$  – температура компримированного воздуха перед трубой, °С;

$p_{mp}$  - давление воздуха перед трубой, кПа;  
 $A$  - коэффициент эффективности работы вихревой трубы;

$\Delta t_c$  - температурный перепад холодного потока воздуха.

11. Система уравнений, выражающая энергетический баланс жидких, газовых сред и их смесей в СОСНВ:

$$\begin{cases} H_{жсi}^{II} = \frac{P_{i,i+1} - P_{i,i-1}}{\rho_{жс} \cdot g} + \frac{P_{ci}}{\rho_{жс} \cdot g} + \frac{v_{i,i+1}^2 - v_{i,i-1}^2}{2 \cdot g} + H_{i,i+1} - H_{i-1,i} + \Delta h_i + \Delta h_{\psi i} + R_i \cdot Q_{жсi}^2 + R_{смi} \cdot Q_{смi}^2 + J_i; \\ H_{зи}^{II} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{\rho_z \cdot g} + \sum_{i=1}^n (R_{zi} \cdot Q_{zi}^2); R_i = \left( \lambda_i \frac{l_i}{D_i} + \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 D_i^4 g}. \end{cases} \quad (14)$$

Математическая модель СОБВ (рис. 5) представлена комплексом из 21 уравнения.

1. Уравнение, выражающее производительность СОБВ:

$$Q_{БВ} = Q_{фБВ} + Q_{обрБВ}. \quad (15)$$

2. Выражения, определяющие основные параметры кавитатора:

$$\begin{aligned} D_2 &= 102,72 \sqrt{\frac{Q_{БВ}}{\sqrt{(p_1 - p_s) \cdot \rho}}}; \quad D_4 = 2 \cdot D_2; \quad \Delta p = p_1 - p_s; \\ p_s &= -209,8 + 0,779 \cdot e + 0,9 \cdot l + 1,795 \cdot \Delta p + 64,014 \cdot F_4 / F_2 + 0,305 \cdot e \cdot \Delta p - \\ &- 2,696 \cdot l \cdot F_4 / F_2 - 0,446 \cdot \Delta p \cdot F_4 / F_2; \\ l &= 1,6457 + 0,0788 \cdot e + 0,0101 \cdot \Delta p + 0,032 \cdot e \cdot \Delta p; \quad Q_s = 0,1 \cdot Q_{БВ}. \end{aligned} \quad (16)$$

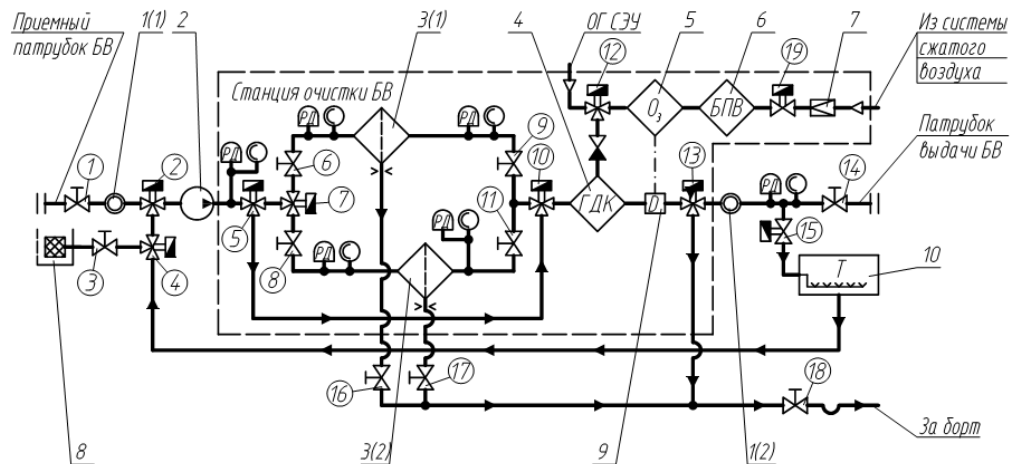
3. Уравнение, определяющее производительность озонатора:

$$Q_{O_3} = C_{O_3} \cdot Q_z, \quad (17)$$

где  $Q_z$  - объемная скорость разлагаемого газа, м<sup>3</sup>/с;

$C_{O_3}$  - концентрация озона в озонозовоздушной смеси, г/м<sup>3</sup>.

4. Уравнение, описывающее материальный баланс в озонаторе:



(1)...(19) - краны для переключения режимов работы

Рисунок 5 – Принципиальная схема СОБВ:

1(1)...1(2) - расходомер; 2 - насос балластный; 3(1)...3(2) - фильтр короткоцикловый самоочищающийся; 4 - кавитатор гидродинамический; 5 - озонатор; 6 - БПВ озонаторного агрегата; 7 - клапан редуционный; 8 - ящик забортный; 9 - датчик окислительно-восстановительного потенциала; 10 - танки балластные СКПО

$$C_{O_3} = C_a \left( 1 - e^{-k_1 \frac{N}{Q_z}} \right), \quad (18)$$

где  $C_a$  - стационарная концентрация озона, г/м<sup>3</sup>;

$k_1$  - сумма констант скоростей образования и разложения озона, отнесенной к единице удельной мощности разряда, м<sup>3</sup>/(Вт·с);

$N$  - активная мощность разряда, Вт.

5. Выражения, определяющие параметры озонирующего элемента (ОЭ):



$$N = N_0 (1 - k_{o_3} p_{o_3})$$

$$F_{p.z.} = \frac{N}{8 f U_1 \varepsilon_z \left[ (U_0 - U_1) \frac{\varepsilon_z}{\Delta_\delta} - \frac{U_1}{\Delta_z} \right]}; \Delta_z^{omn} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} U_0 - 0,5}{16,5 \cdot (p_{o_3} + 100)}, \quad (19)$$

где  $N_0$  - мощность разряда, Вт;

$k_{o_3}$  - коэффициент, учитывающий давление  $p_{o_3}$ , 1/кПа;

$p_{o_3}$  - давление озона в ОЭ, кПа;

$F_{p.z.}$  - площадь разрядной зоны ОЭ, м<sup>2</sup>;

$f$  - частота электротока, Гц;

$U_1, U_0$  - напряжение горения и рабочее напряжение соответственно, В;

$\varepsilon_z, \varepsilon_\delta$  - диэлектрические постоянные газа и диэлектрического барьера, Ф/м;

$\Delta_z, \Delta_\delta$  - толщина диэлектрического барьера и разрядного промежутка, м.

6. Система выражений, описывающая работу БПВ с адсорберами и вихревой трубой:

$$Q_{ex} = \frac{Q_z}{\mu_x \left( 1 - 1,2 \frac{p_{atm}}{p_{ex}} \right)}; \tau_{ex} = \frac{\tau_n^{0,5} D_{cp} \cdot \lg \frac{d}{d_0}}{0,265 (p_{ex} \cdot 10^{-2})^{-0,5}}; F_a = 1,2 \frac{Q_{ex}}{v_a};$$

$$H_a = \tau_{ex} \cdot v_a; A = 0,18 \left[ 1 - \left( \frac{100}{p_{mp}} \right)^{0,29} \right]; \Delta t_x = A \cdot T_{mp}, \quad (20)$$

где  $\mu_x$  - динамическая вязкость воздуха при рабочей температуре, Па·с;

$p_{atm}, p_{ex}$  - давление воздуха атмосферное и перед адсорберами, кПа;

$\tau_{ex}, \tau_n$  - время пребывания воздуха в осушителе, полуцикла, с;

$D_{cp}$  - средний диаметр гранул адсорбента, м;

$d_0$  - влагосодержание исходного воздуха, г/м<sup>3</sup>;

$F_a$  - площадь адсорбера, м<sup>2</sup>;

$v_a$  - скорость потока воздуха через осушитель, м/с;

$H_a$  - высота слоя адсорбента, м.

7. Система уравнений, выражающая энергетический баланс жидких и газовых сред, а также их смесей в системе:

$$\begin{cases} H_{жi}^{II} = \frac{p_{i,i+1} - p_{i,i-1}}{\rho_{ж} \cdot g} + \frac{p_{ci}}{\rho_{ж} \cdot g} + \frac{v_{i,i+1}^2 - v_{i,i-1}^2}{2 \cdot g} + H_{i,i+1} - H_{i-1,i} + \Delta h_i + \Delta h_{\psi i} + R_i \cdot Q_{жi}^2 + R_{смi} \cdot Q_{смi}^2 + J_i; \\ H_{зи}^{II} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{\rho_z \cdot g} + \sum_{i=1}^n (R_{zi} \cdot Q_{zi}^2); R_i = \left( \lambda_i \frac{l_i}{D_i} + \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 D_i^4 g}. \end{cases} \quad (21)$$

Математическая модель системы переработки осадка СВ и пищевых отходов (рис. 6) выражается в системе 12 уравнений.

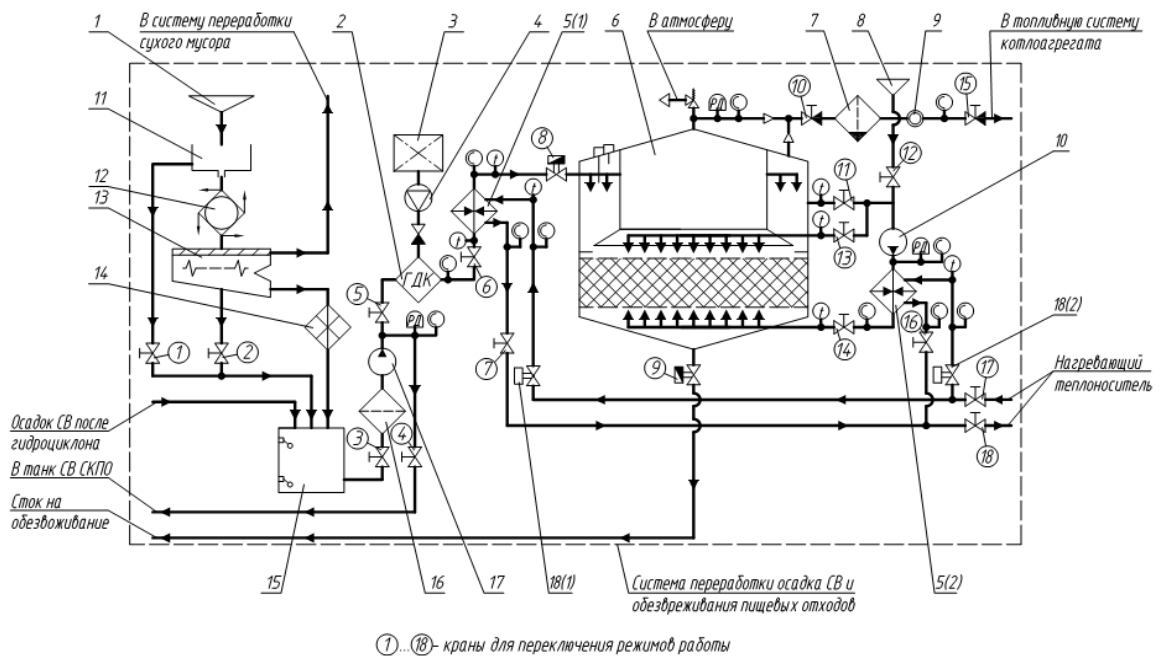


Рисунок 6 – Принципиальная схема системы переработки осадка СВ и обезвреживания пищевых отходов:

1 – устройство приемное; 2 – кавитатор гидродинамический; 3 – расходный бак реагента для химического гидролиза; 4 – насос-дозатор; 5(1)...5(2) – аппарат теплообменный; 6 – метантенк; 7 – фильтр-влажготделитель; 8 – устройство загрузочное биологического субстрата; 9 – расходомер; 10 – насос циркуляционный; 11 – бункер пищевых отходов; 12 – питатель роторный; 13 – устройство сортировочное; 14 – измельчитель; 15 – танк органического субстрата; 16 – фильтр сетчатый; 17 – насос субстрата; 18(1)...18(2) – вентиль терморегулирующий

1. Уравнение, определяющее расчетную производительность системы:

$$Q_B = 0,1 \cdot Q_{CB} + 0,3 \cdot Q_{CM \max} \quad (22)$$

2. Выражение, определяющее период задержки при сбраживании:

$$\tau = 0,532 \cdot (100 - d_{mud}) \quad (23)$$

где  $d_{mud}$  – влажность загружаемого осадка, %.

3. Система выражений, определяющая режимные показатели процесса:

$$\begin{aligned} Q_{сух} &= 0,92 \cdot 10^{-4} \cdot C \cdot Q_{CB} + 0,105 \cdot Q_{CM \max}; \\ m_{ср} &= \left(0,53 - \frac{0,13}{100 - d_{mud}}\right) \cdot (0,92 \cdot 10^{-4} \cdot C \cdot Q_{CB} + 0,105 \cdot Q_{CM \max}); \\ m_{сн} &= \left(0,92 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot Q_{CB} + 0,105 \cdot Q_{CM \max}\right) \cdot \left(0,47 - \frac{0,13}{100 - d_{mud}}\right); \\ Q_g &= \left(12,72 - \frac{3,12}{100 - d_{mud}}\right) \cdot (0,92 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot Q_{CB} + 0,105 \cdot Q_{CM \max}), \end{aligned} \quad (24)$$

где  $Q_{сух}$  – расход остатка по сухому веществу, кг/ч;

$C$  – начальная концентрация взвешенных веществ, г/м<sup>3</sup>;

$m_{ср}, m_{сн}$  – масса распавшегося и нераспавшегося (стока) беззольного вещества осадка, кг/ч;

$Q_g$  – суточный объем генерируемого газа, м<sup>3</sup>/сут.

4. Система уравнений, определяющая геометрию метантенка:

$$V_{MT} = 21,778 \cdot k_y \cdot (100 - d_{mud}) \cdot (0,1 \cdot Q_{CB} + 0,3 \cdot Q_{CM \max}); \quad Q_{Bo} = 0,0075 \cdot V_{MT}, \quad (25)$$

где  $V_{MT}$  – объем метантенка, м<sup>3</sup>;

$Q_{Bo}$  – расход циркулирующего осадка, м<sup>3</sup>/ч.

5. Выражение, характеризующее тепловой режим системы:

$$Q_{парMT} = 1,701 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{CB} + 5,103 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{CM \max} + 0,148 \cdot 10^{-3} \cdot F_{MT}. \quad (26)$$

6. Система уравнений, выражающая энергетический баланс жидких, газовых сред и их смесей в системе:

$$\begin{cases} H_{\text{эс}i}^{\text{II}} = \frac{P_{i,i+1} - P_{i,i-1}}{\rho_{\text{эс}} \cdot g} + \frac{P_{\text{с}i}}{\rho_{\text{эс}} \cdot g} + \frac{v_{i,i+1}^2 - v_{i,i-1}^2}{2 \cdot g} + H_{i,i+1} - H_{i-1,i} + \Delta h_i + \Delta h_{\text{пр}i} + R_i \cdot Q_{\text{эс}i}^2 + R_{\text{с}mi} \cdot Q_{\text{с}mi}^2 + J_i; \\ H_{\text{с}i}^{\text{II}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{\rho_2 \cdot g} + \sum_{i=1}^n (R_{\text{с}i} \cdot Q_{\text{с}i}^2); R_i = \left( \lambda_i \frac{l_i}{D_i} + \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 D_i^4 g}. \end{cases} \quad (27)$$

Математическая модель системы переработки сухого мусора (рис. 7) описывается 3 уравнениями.

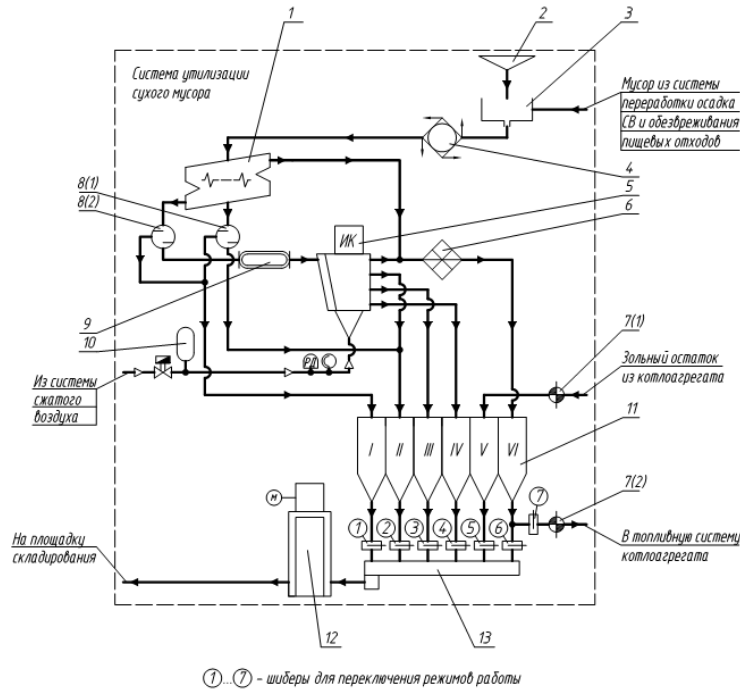


Рисунок 7 – Принципиальная схема системы утилизации сухого мусора:

1 – сепаратор баллистический; 2 – устройство приемное; 3 – бункер сухого мусора; 4 – дозатор роторный; 5 – воздушный сепаратор оптической сортировки; 6 – измельчитель; 7(1)...7(2) – питатель винтовой; 8(1)...8(2) – металлоуловитель; 9 – стол разгонный; 10 – ресивер воздушный; 11 – бункер отсортированных отходов (I – черный металлолом; II – несжигаемые отходы; III – стекло; IV – цветной металлолом; V – зольный остаток из котлоагрегата; VI – сжигаемые отходы); 12 – пресс пакетировочный гидравлический; 13 – дозатор объемный

1. Уравнение, выражающее максимальную производительность системы переработки сухого мусора:

$$Q_{\text{с}m \text{ max}} = Q_{\text{нсм}} + Q_{\text{спо}} + Q_{\text{ссм}} + [Q_{\text{с}x}]_{\text{с}m} \cdot \quad (28)$$

2. Уравнения, характеризующие основные элементы системы – баллистический сепаратор, дробилку, металлоуловитель, классификатор, главные транспортеры, винтовой питатель сжигаемых отходов:

$$Q_{\text{бс}} = Q_{\text{кд}} = Q_{\text{кв}} = Q_{\text{км}} = Q_{\text{гт}} = 0,7 \cdot Q_{\text{с}m \text{ max}}; Q_{\text{вп}} = 0,49 \cdot Q_{\text{с}m \text{ max}}, \quad (29)$$

где  $Q_{\text{бс}}, Q_{\text{кд}}, Q_{\text{кв}}, Q_{\text{км}}$  – производительность баллистического сепаратора, дробилки, классификатора воздушного, металлоуловителя по сухим отходам, т/ч;

$Q_{\text{гт}}, Q_{\text{вп}}$  – подача главных транспортеров и винтового питателя сжигаемых отходов соответственно, т/ч.

Схема СОГ и утилизации сжигаемых отходов в котлоагрегате представлена на рис. 8.

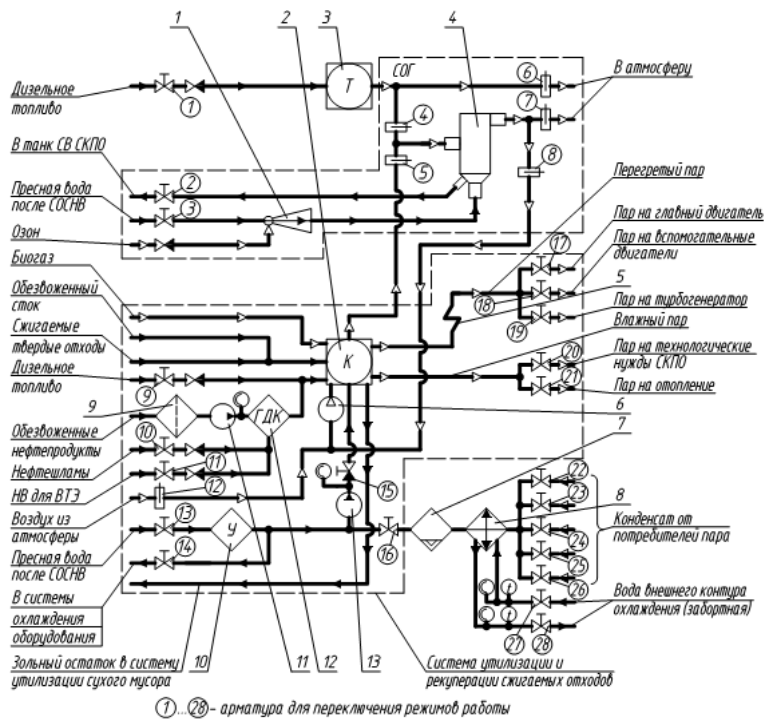


Рисунок 8 – Принципиальная схема СОГ и утилизации сжигаемых отходов

1 – эжектор; 2 – главный автономный паровой котлоагрегат; 3 – вспомогательный ДВС; 4 – ЦПА; 5 – пароперегреватель; 6 – воздуходувка наддува котлоагрегата; 7 – маслоотделитель; 8 – главный конденсатор; 9 – фильтр топливный; 10 – умягчительная установка; 11 – насос топливный; 12 – кавитатор гидродинамический; 13 – насос питательный.

Математическая модель утилизации сжигаемых отходов в автономном паровом котлоагрегате состоит из 4 уравнений.

1. Уравнение, находящее паропроизводительность котлоагрегата:

$$Q_{\text{пар}} = 1,025 \cdot Q_{\text{пар0}} \cdot N_{\text{егД}} + \frac{2,01 \cdot N_{\text{егТГ}}^2}{N_{\text{егД}}} + 1,743 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\text{СВ}} + 5,231 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\text{СМmax}} + 0,151 \cdot 10^{-3} \cdot F_{\text{МТ}}. \quad (30)$$

2. Выражение, определяющее суммарный расход теплоты, требуемой на производство пара:

$$Q_{\text{Спар}} = 75,925 \cdot Q_{\text{пар0}} \cdot N_{\text{егД}} + \frac{148,888 \cdot N_{\text{егТГ}}^2}{N_{\text{егД}}} + 0,013 \cdot Q_{\text{СВ}} + 0,038 \cdot Q_{\text{СМmax}} + 85,259 \cdot 10^{-3} \cdot F_{\text{МТ}}. \quad (31)$$

3. Выражение, отражающее суммарное количество теплоты, генерируемое при переработке всех видов отходов без добавления других топлив:

$$Q_{\Sigma} = 51729 \cdot Q_{\text{СВ}} + 899210 \cdot Q_{\text{СМmax}} + 100699,5 \cdot Q_{\text{НВ}}. \quad (32)$$

4. Уравнение теплового баланса СКПО:

$$75,925 \cdot Q_{\text{пар0}} \cdot N_{\text{егД}} + \frac{148,888 \cdot N_{\text{егТГ}}^2}{N_{\text{егД}}} + 0,013 \cdot Q_{\text{СВ}} + 0,038 \cdot Q_{\text{СМmax}} + 85,259 \cdot 10^{-3} \cdot F_{\text{МТ}} + 24 \cdot Q_{\text{от}}^{\text{г.д.}} \cdot N_e^{\text{г.д.}} \cdot Q_{\text{нт}}^{\text{п}} = 51729 \cdot Q_{\text{СВ}} + 899210 \cdot Q_{\text{СМmax}} + 100699,5 \cdot Q_{\text{НВ}} + 10^{-3} \cdot m_{\text{T}} \cdot Q_{\text{нт}}^{\text{п}}. \quad (33)$$

Математическая модель СОГ котлоагрегата и ОГ вспомогательных ДВС представлена 11 уравнениями.

1. Уравнение, выражающее необходимую производительность СОГ:

$$Q_{\text{с3}}^{\text{ЦПА}} = Q_{\text{с2}}^{\text{кЦПА}} + Q_{\text{с2}}^{\text{г.д.ЦПА}}. \quad (34)$$

2. Выражение, определяющее массовый расход газов от котлоагрегата при утилизации сжигаемых отходов:

$$Q_{\text{с}}^{\text{к}} = 1,329 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\text{СВ}} + 2,311 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{\text{СМmax}} + 2,588 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{\text{НВ}}. \quad (35)$$

3. Выражение, характеризующее массовый расход ОГ от вспомогательных ДВС:

$$Q_{\text{с}}^{\text{г.д.}} = 0,115 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_2 \cdot Q_{\text{от}}^{\text{г.д.}} \cdot N_e^{\text{г.д.}} \cdot T_{\text{с2}} \cdot \rho_{\text{с2}} \cdot \chi \cdot \Phi, \quad (36)$$

где  $\alpha_2$  - коэффициент избытка воздуха, определяемый конструкцией и особенностями рабочего процесса ДВС;

$Q_{от}^{6,d}$  - удельный расход топлива ДВС, кг/(кВт·ч);

$T_{22}$  - температура ДГ на выходе из ДВС, °С;

$\rho_{22}$  - плотность ДГ на выходе из ДВС, кг/м<sup>3</sup>;

$\chi, \Phi$  - коэффициент рециркуляции и продувки соответственно.

4. Система уравнений, определяющая баланс воды в ЦПА:

$$Q_g^{ЦПА} = Q_{CB}^{ЦПА} + Q_{исп}^{ЦПА}; \quad Q_{исп}^{ЦПА} = 3,6 \cdot Q_{23}^{ЦПА} \cdot \rho_{23} \cdot (d_2 - d_1), \quad (37)$$

где  $d_1, d_2$  - влагосодержание «до» и «после» ЦПА, кг/кг.

5. Система выражений, описывающих параметры ЦПА:

$$H_0 = 0,69 \cdot H_n^{1,14} / v_z^{0,65};$$

$$D_k = \sqrt{\frac{Q_z^{ЦПА}}{2,82 \cdot 10^3 \cdot \rho_{z2} \cdot v_z}}; \quad D = \sqrt{D_k^2 + \frac{4 \cdot Q_z^{ЦПА}}{\pi \cdot \rho_{z1} \cdot v_z}}. \quad (38)$$

6. Система уравнений, выражающая энергетический баланс жидких, газовых сред и их смесей в системе:

$$\begin{cases} H_{эсi}^{II} = \frac{P_{i,i+1} - P_{i,i-1}}{\rho_{жс} \cdot g} + \frac{P_{ci}}{\rho_{жс} \cdot g} + \frac{v_{i,i+1}^2 - v_{i,i-1}^2}{2 \cdot g} + H_{i,i+1} - H_{i-1,i} + \Delta h_i + \Delta h_{\text{вп}} + R_i \cdot Q_{эсi}^2 + R_{сми} \cdot Q_{сми}^2 + J_i; \\ H_{эсi}^{II} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{\rho_z \cdot g} + \sum_{i=1}^n (R_{zi} \cdot Q_{zi}^2); \quad R_i = \left( \lambda_i \frac{l_i}{D_i} + \sum_{j=1}^m \xi_{ij} \right) \cdot \frac{8}{\pi^2 D_i^4 g}. \end{cases} \quad (39)$$

Представленные математические модели служат основой для методики проектирования комплекса систем СКПО с применением возобновляемой энергии, алгоритм проектирования которого представлен на рис. 9. Выбор производительности систем СКПО производится по среднему количеству обслуживаемых за определенное время судов.

Использование результатов работы позволяет:

1. Производить переработку, утилизацию и рекуперацию всех основных видов судовых отходов (СВ, НВ, БВ, судового мусора и пищевых отходов) в комплексе систем СКПО.

2. Разработать новые принципиальные схемы судовых систем: СОСВ, СОНВ, СОСНВ, СОБВ, СОГ, переработки судового мусора, пищевых отходов, биогазовой установки, термической утилизации отходов в котлоагрегате, а также СКПО в целом, позволяющие удовлетворить всем современным требованиям регламентирующей нормативной документации. Новизна схем систем подтверждена патентами РФ.

3. Обеспечить ресурсо- и энергосбережение за счет значительного снижения затрат нефтяного топлива путем использования на СКПО в качестве его заменителей продуктов переработки отходов.

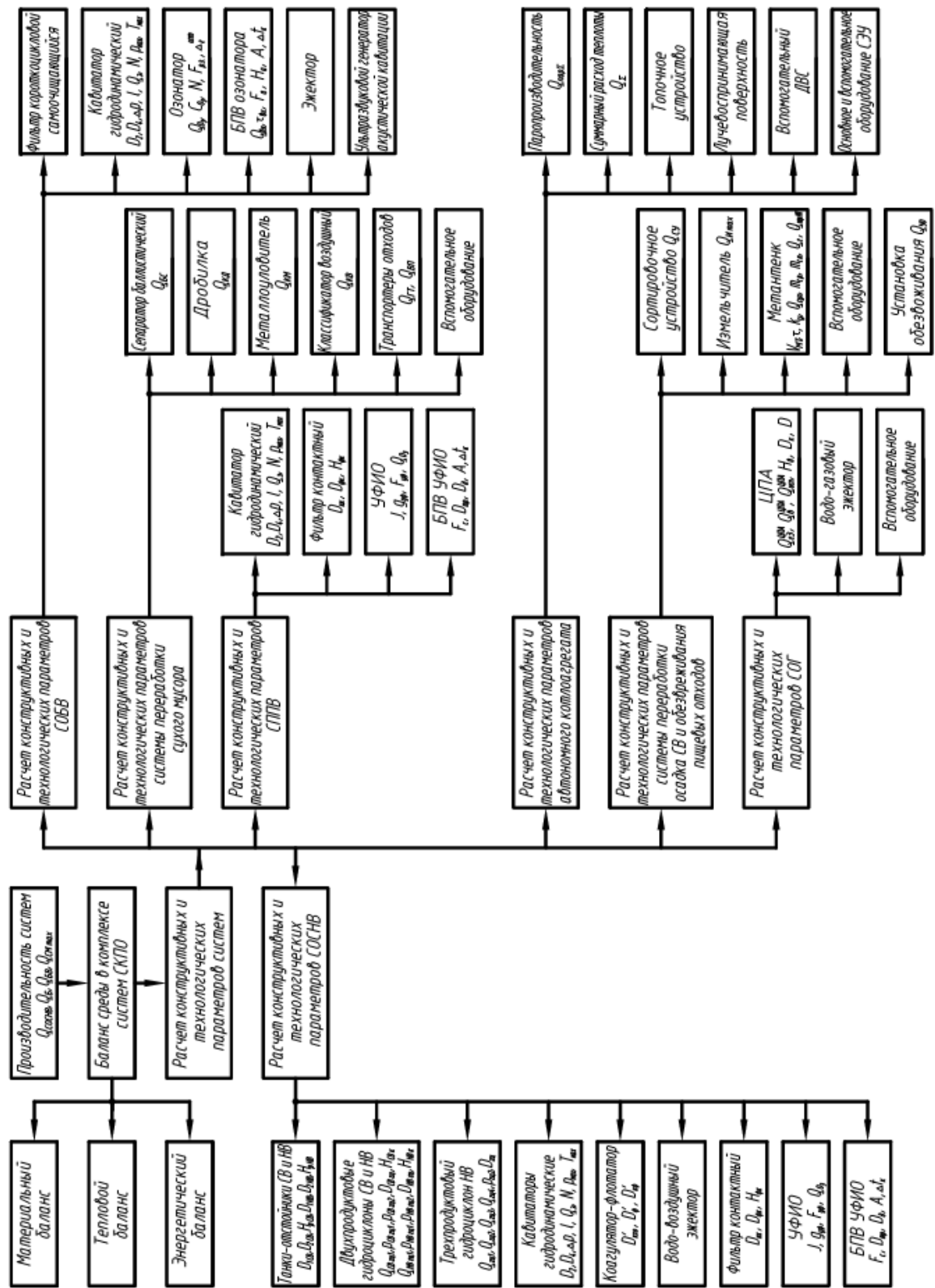


Рисунок 9 – Алгоритм проектирования комплекса систем СКПО с использованием ВДЭ

4. Повысить энергоэффективность при переработке и утилизации основных видов судовых отходов путем применения комплексного подхода и взаимодействия систем СКПО.

5. Применить новые, защищенные патентами РФ, конструкции узлов и элементов систем, что позволяет уменьшить их массо-габаритные характеристики и энергопотребление, повысить надежность и автономность.

6. Разработать методику проектирования как отдельных систем, так и объединенного комплекса взаимодействующих систем экологического назначения для СКПО, позволяющую принимать обоснованные технологические и конструкторские решения.

7. Рассчитать эксплуатационные параметры работы указанного комплекса систем СКПО.

## THE METHODOLOGY OF DESIGNING COMPLEX SYSTEMS IWMS RIVER FLEET WITH RENEWABLE ENERGY

D.S. Mizgirev, A.S. Kurnikov

Keywords: court integrated waste, IWMS, renewable energy, design IWMS, the method of calculation of system processing complex IWMS.

In the article discuss the technique of designing complex systems IWMS river fleet with renewable energy. Shipboard wastes and products of their processing are considered from the point of view of their use as sources of renewable energy. Given the structure of the IWMS, a mathematical model of the system processing complex, the method of calculation of complex interacting systems IWMS.