

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ-ДАТЧИКОВ

**М.А. Прищепов, докт. техн. наук, доцент, И.И. Гургенидзе, канд. экон. наук,
ст. научный сотрудник, ИТ. Руткоаский, ассистент (УО БГАТУ)**

Непрерывный рост цен на топливно-энергетические ресурсы и в особенности на электроэнергию обуславливает увеличение энергетической составляющей в себестоимости продукции, что снижает прибыль предприятия и конкурентоспособность конечной продукции как на внутреннем, так и на внешнем рынке. Как известно, электронагрев относится к разряду энергоемких стационарных тепловых процессов, требующих значительных затрат денежных средств предприятия. Одной из важнейших задач экономики в «•ременной энергетике является всемерное повышение эффективного использования электроэнергии как самого дорогого в настоящее время энергоносителя в Республике Беларусь. Именно поэтому это требование является первоочередным к разрабатываемым электронагревательным установкам (ЭНУ). Значительный перерасход электроэнергии может происходить из-за теплоемкости промежуточных теплоносителей, что приводит также к перерегулированию или «ременному отключению ЭНУ после достижения обрабатываемой средой требуемой температуры. Чтобы [обеспечить нагрев обрабатываемой среды до температуры, определяемой требованиями технологического процесса, современные ЭНУ оснащаются, как правило, [пряжюгостоящими терморегуляторами, обеспечивающими • реализацию необходимого закона регулирования. Ис- I пользование электродных электронагревателей-датчиков I [ЭЭН-Д) для нагрева обрабатываемой среды исключает I влияние теплоемкости промежуточного теплоносителя и, кроме того, позволяет получить информационный сигнал, характеризующий температуру в межэлектродном пространстве ЭЭН-Д. Для этого параллельно E ЭЭН-Д подключаются два последовательно соединенные I еоиротивления, так что образуется измерительный I мост и с общей точки соединения этих сопротивлений и промежуточного электрода снимается сигнал, который указывает на изменение температуры нагрева. (Мощный сигнал разбаланса мостовой измерительной схемы и отсутствие промежуточных теплоносителей |двмчительно упрощает и снижает стоимость термо- ^ регулятора. Однако при этом возрастает материало- I емкость электродного нагревателя, что обуславливает ' увеличение капиталовложений.

Изменяя конструктивные параметры ЭЭН-Д, изменяют и сигнал разбаланса мостовой измерительной схемы. Для высокого сигнала разбаланса мостовой измерительной схемы можно использовать терморегулятор с более простой схемой управления. Такой терморегулятор, естественно, будет дешевле. Независимо от стоимости терморегулятора, ЭНУ должна обеспечивать температуру обрабатываемой среды, согласно требованиям технологического процесса. Следовательно, расход электроэнергии на нагрев обрабатываемой среды можно принять одинаковым.

Задачей технико-экономической оптимизации является разработка такой ЭНУ, которая обеспечит заданные технологические требования при минимальных приведенных затратах. На их величину влияют стоимость нагревателя и терморегулятора, а также затраты на эксплуатацию, обслуживание и ремонт ЭНУ.

Оптимизация ЭЭН-Д в математическом плане сводится к поиску минимального значения принятой целевой функции (приведенных затрат Z_{II}) при выполнении определенных ограничений [1, 2]. В задачах подобного типа с равным успехом в качестве критерия эффективности может быть принят и чистый дисконтированный доход. Тогда для принятого критерия оптимизации целевая функция может быть записана следующим образом:

$$Z_{II} = (K_{ЭНУ} + I_{ЭНУ} \cdot \alpha_T) \cdot \min, \quad (1)$$

где $K_{ЭНУ}$ - капиталовложения, руб;

$I_{ЭНУ}$ - ежегодные эксплуатационные издержки, руб/год;

α_T - коэффициент приведения к начальному периоду по времени.

Капиталовложения в ЭНУ определяются стоимостью нагревателя и терморегулятора:

$$K_{ЭНУ} = K_{м_{ЭЭН-Д}} + K_{и_{ЭЭН-Д}} + K_{ТР}, \quad (2)$$

где $K_{м_{ЭЭН-Д}}$ - стоимость материалов и комплектующих для ЭЭН-Д, с учетом транспортных расходов, руб;

$K_{и_{ЭЭН-Д}}$ - стоимость изготовления ЭЭН-Д, руб;

K_{TP} – стоимость терморегулятора, руб.

Ежегодные эксплуатационные издержки включают затраты на эксплуатацию, обслуживание и ремонт ЭНУ. Коэффициент приведения к начальному периоду по времени рассчитывается по формуле:

$$\alpha_T = \frac{(1+E)^T - 1}{E \cdot (1+E)^T}, \quad (3)$$

где T – конечный год получения дохода;
 E – процентная ставка (норма дисконта), %.

В технико-экономических расчетах срок службы энергетического оборудования определяется из выражения:

$$T = \frac{100}{P_A}, \quad (4)$$

где P_A – норма амортизационных отчислений, %.

Стоимость материалов и комплектующих для ЭЭН-Д складывается из стоимости корпуса ЭЭН-Д K_K и стоимости электродов K_{Σ} :

$$K_{M_{\text{ЭЭН-Д}}} = K_K + K_{\Sigma}. \quad (5)$$

Для конкретной конструкции ЭЭН-Д можно принять зависимость стоимости корпуса от габаритных размеров и стоимости его материала. Габаритные размеры в свою очередь зависят от размера электродных камер для всех зон нагрева и размера переходных камер между соседними зонами нагревателя. Размер электродных и переходных камер рассчитывается по размерам электродов, межэлектродному расстоянию и количеству зон нагрева.

$$K_K = f_1(P_k, L_k, H_k, Kz, C_{M_K}), \quad (6)$$

где $k=1..Kz$;

Kz – количество зон в ЭЭН-Д, шт;

P_k – ширина электрода на k -й зоне нагрева ЭЭН-Д, м;

H_k – межэлектродное расстояние на k -й зоне нагрева ЭЭН-Д, м;

L_k – длина электрода на k -й зоне нагрева ЭЭН-Д, м;

C_{M_K} – стоимость материала корпуса, руб.

Стоимость электродов будет определяться количеством электродов, их габаритными размерами и стоимостью материала электродов.

$$K_{\Sigma} = f_2(P_k, L_k, Kz, C_{M_{\Sigma}}), \quad (7)$$

где $C_{M_{\Sigma}}$ – стоимость материала электродов, руб.

Стоимость терморегулятора зависит от величины информационного сигнала:

$$K_{TP} = \begin{cases} K_{TC}, & \text{при } \Delta U \leq \Delta U_{TC}; \\ K_{CU}, & \text{при } \Delta U_{TC} \leq \Delta U \leq U_{TP}; \\ K_{TP}, & \text{при } \Delta U \geq U_{TP}, \end{cases} \quad (8)$$

где ΔU – сигнал разбаланса мостовой измерительной схемы ЭЭН-Д, определяемый температурой обрабатываемой среды, В;

ΔU_{TC} – сигнал разбаланса мостовой измерительной схемы с терморезистором, В;

U_{TP} – напряжение срабатывания герконного реле, В;

K_{TC} – стоимость терморегулятора, в котором используется датчик ТСМ или ТСП, руб;

K_{CU} – стоимость терморегулятора в котором сигнал датчика выше ΔU_{TC} , но ниже U_{TP} , руб;

K_{TP} – стоимость терморегулятора управляемого герконным реле, руб.

Терморегулятор, при $\Delta U_{TC} \leq \Delta U \leq U_{TP}$, будет дороже терморегулятора, управляемого герконным реле (K_{TP}), и дешевле терморегулятора с датчиком ТСМ или ТСП (K_{TC}). Если принять линейной обратно пропорциональную зависимость между величиной сигнала датчика и стоимостью терморегулятора, то стоимость терморегулятора можно найти из выражения:

$$K_{CU} = K_{TP} + (K_{TC} - K_{TP}) \cdot \frac{U_{TP} - \Delta U}{U_{TP} - \Delta U_{TC}}. \quad (9)$$

Тогда при $K_{TP}=10$ у.е., $K_{TC}=100$ у.е., $\Delta U_{TC}=0,1$ В, $U_{TP}=1$ В зависимость стоимости терморегулятора от величины сигнала разбаланса моста будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Проводя оптимизацию, необходимо учитывать K_{TP} , у.е.

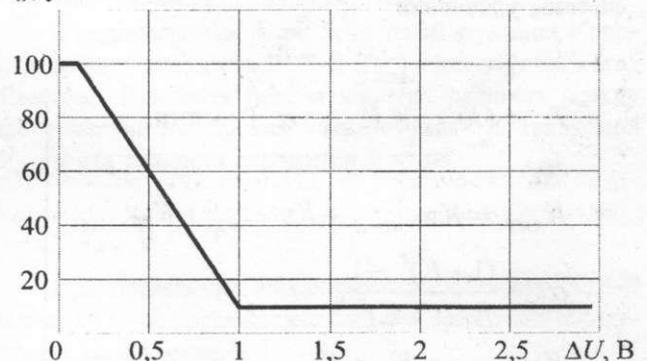


Рис. 1. Зависимость стоимости терморегулятора K_{TP} от величины сигнала разбаланса моста ΔU при расчете по выражениям (8) и (9)

ограничения как по допустимой плотности тока в межэлектродном пространстве, так и по габаритным размерам ЭЭН-Д. Соответственно, вводя ограничения по наибольшей длине электронагревателя, минимальной ширине электродов и минимальному межэлектродному расстоянию, их можно записать в следующем виде:

$$J - J_{\text{дон}} \leq \nu; \quad (10)$$

$$\sum_{Kz} L_k - L_n \leq \chi; \quad (11)$$

$$H_k - H_{\text{мин}} \geq \delta; \quad (12)$$

$$P_k - P_{\min} \geq \phi, \quad (13)$$

где k - номер зоны ЭЭН-Д, $k=1 \dots Kz$;

J - плотность тока в межэлектродном пространстве, A/m^2 ;

$J_{\text{дон}}$ - наибольшая допустимая плотность тока, A/m^2 ;

L_n - наибольшая допустимая длина электронагревателя, м;

H_{\min} - наименьшее допустимое межэлектродное расстояние, м;

Π_{\min} - наименьшая допустимая ширина электродов, м;

ν, ϕ, χ, δ - погрешности, характеризующие точность выполнения ограничений.

При изменении конструктивных параметров ЭЭН-Д (длины, ширины и межэлектродного расстояния) происходит и изменение мощности, выделяемой в межэлектродном пространстве. Следовательно, изменение конструктивных параметров необходимо производить так, чтобы мощность электродного нагревателя оставалась заданной:

$$P_{\text{наг}} = \text{const} \quad (14)$$

Для этого на каждом шаге оптимизации, изменив длину электродов или межэлектродное расстояние, проводим изменение ширины электродов, корректируя тем самым мощность ЭЭН-Д.

Таким образом, математическую модель задачи технико-экономической оптимизации конструктивных параметров ЭЭН-Д можно записать в виде следующей системы уравнений:

$$Z_{\Pi} = (K_{\text{ЭНУ}} + I_{\text{ЭНУ}} \cdot \alpha_T) \rightarrow \min,$$

где

$$K_{\text{ЭНУ}} = K_{M_{\text{ЭЭН-Д}}} + K_{u_{\text{ЭЭН-Д}}} + K_{T_P};$$

$$\alpha_T = \frac{(1+E)^T - 1}{E \cdot (1+E)^T};$$

$$K_{M_{\text{ЭЭН-Д}}} = K_K + K_{\text{Э}};$$

$$K_K = f_1(\Pi_k, L_k, H_k, Kz, C_{M_K});$$

$$K_{\text{Э}} = f_2(\Pi_k, L_k, Kz, C_{M_{\text{Э}}});$$

$$K_{T_P} = \begin{cases} K_{T_C}, & \text{при } \Delta U \leq \Delta U_{T_C}; \\ K_{C_U}, & \text{при } \Delta U_{T_C} \leq \Delta U \leq U_{T_P}; \\ K_{T_P}, & \text{при } \Delta U \geq U_{T_P}; \end{cases} \quad (15)$$

$$K_{C_U} = K_{T_P} + (K_{T_C} - K_{T_P}) \cdot \frac{U_{T_P} - \Delta U}{U_{T_P} - \Delta U_{T_C}}$$

при

$$J - J_{\text{дон}} \leq \nu;$$

$$\sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n \leq \chi;$$

$$H_k - H_{\min} \geq \delta;$$

$$\Pi_k - \Pi_{\min} \geq \varepsilon;$$

$$P_{\text{наг}} = \text{const}.$$

Для сведения исходной задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации воспользуемся методом внешних штрафных функций. Тогда для рассматриваемой оптимизации внешнюю штрафную функцию можно записать в виде:

$$\Phi(x, \alpha) = \xi [\zeta(x) + \lambda(x) + \vartheta(x) + \psi(x)], \quad (16)$$

где ξ - коэффициент штрафа;

$\zeta(x), \lambda(x), \vartheta(x), \psi(x)$ - функции, определяемые соответственно ограничениями (10)...(14) исходной задачи.

$$\zeta(x) = \begin{cases} 0, & \text{при} \\ J - J_{\text{дон}} - \nu \leq 0; \\ J - J_{\text{дон}} - \nu, & \text{при } J - J_{\text{дон}} - \nu > 0; \end{cases} \quad (17)$$

$$\lambda(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } \sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n - \chi \leq 0; \\ \sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n - \chi, & \text{при } \sum_{k=1}^{Kz} L_k - L_n - \chi > 0; \end{cases} \quad (18)$$

$$\vartheta(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } H_k - H_{\min} - \delta \geq 0; \\ H_k - H_{\min} - \delta, & \text{при } H_k - H_{\min} - \delta < 0; \end{cases} \quad (19)$$

$$\psi(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } \Pi_k - \Pi_{\min} - \phi \geq 0; \\ \Pi_k - \Pi_{\min} - \phi, & \text{при } \Pi_k - \Pi_{\min} - \phi < 0. \end{cases} \quad (20)$$

В таком случае вспомогательная функция, получаемая при модернизации целевой функции с использованием штрафной функции, примет вид:

$$F(x, \alpha) = Z_{\Pi} + \xi [\zeta(x) + \lambda(x) + \vartheta(x) + \psi(x)]. \quad (21)$$

Блок-схема алгоритма оптимизации параметров ЭЭН-Д методом наискорейшего спуска изображена на рис. 2. В блоке 18 проводится расчет длины корпуса ЭЭН-Д. Для расчета используется формула:

$$SL = \sum_{k=1}^{Kz} L_k.$$

В блок-схеме оптимизации, согласно рис.3 [3], принято, что:

$X1$ - межэлектродное расстояние на 7, 9, 11 зонах

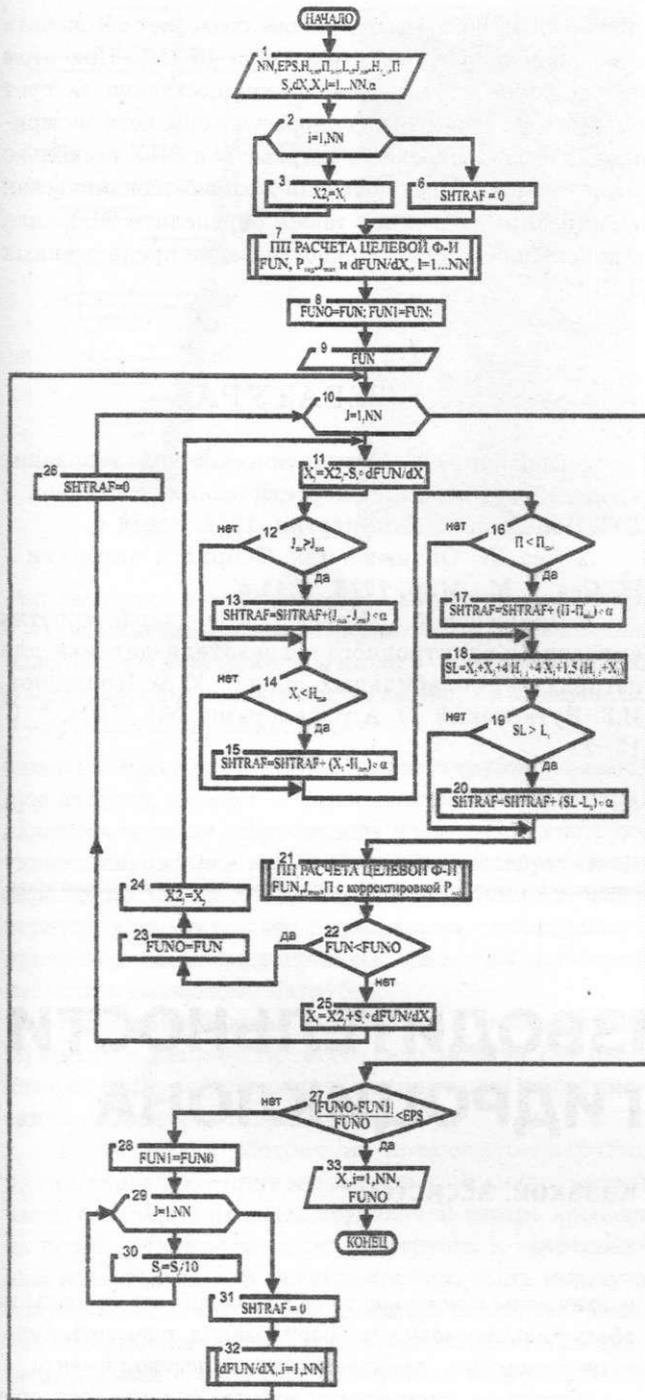


Рис.2. Блок-схема алгоритма оптимизации параметров ЭЭН-Д методом наискорейшего спуска

нагрева;

X_2, X_3 - сумма длин электродов, соответственно, 1, 3, 5 и 7, 9, 11 зон нагрева;

H_1, H_3, H_5 - выбираются, исходя из мощности ЭЭН-Д при нагреве среды и в оптимизации не участвуют;

L_2, L_4, L_6, L_{10} - принимаем по два межэлектродных расстояния;

L_6 - принимаем как три усредненных межэлектродных расстояния на зонах 1-5 и 7-11, т.е.

$$L_6 = 1,5 \cdot (H_{1,5} + X_1).$$

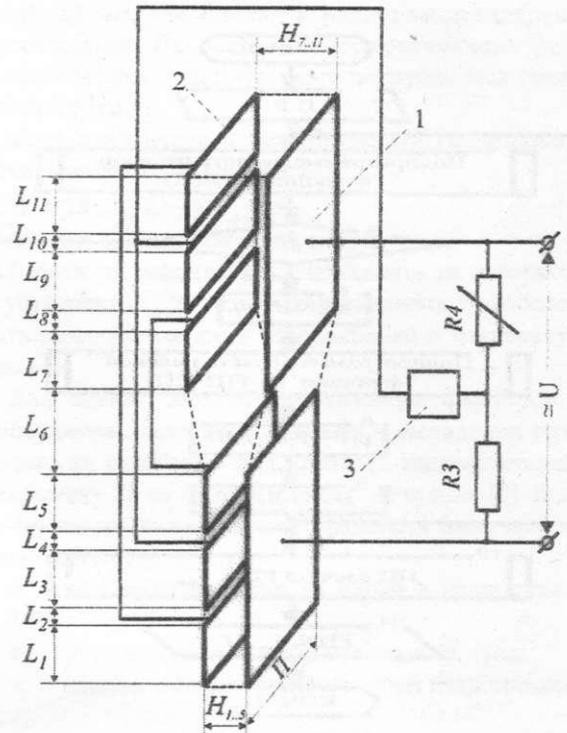


Рис. 3. Электротепловая схема ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой: 1- основные токоподводящие электроды; 2- дополнительные электроды; 3- управляющий орган САР; R3, R4 - термодинамически независимые сопротивления измерительного моста

Тогда общее уравнение расчета длины корпуса ЭЭН-Д примет вид:

$$SL = X_2 + X_3 + 4 \cdot H_{1,5} + 4 \cdot X_1 + 1,5 \cdot (H_{1,5} + X_1).$$

В подпрограмме расчета целевой функции с корректировкой мощности ЭЭН-Д ($P_{наг}$) используется метод Ньютона. При этом рассчитывается разность между фактической мощностью нагревателя P_1 и требуемой $P_{наг}$, и эта разность стремится к нулю.

$$P_1 - P_{наг} = F(\Pi) \rightarrow 0.$$

При проведении корректировки мощности ЭЭН-Д новое $(n+1)$ -ое приближение ширины электродов определяется по формуле:

$$\Pi_{n+1} = \Pi_n - \frac{F(\Pi_n)}{F'(\Pi_n)},$$

где производную $F'(\Pi_n)$, в свою очередь, определяем численно, используя достаточно малое приращение ширины электродов E , по формуле:

$$F'(\Pi_n) = \frac{F(\Pi_n + E) - F(\Pi_n)}{E}.$$

Блок-схема алгоритма расчета целевой функции с корректировкой мощности ЭЭН-Д методом Ньютона приведена на рис. 4.

Анализ использования предложенной методики

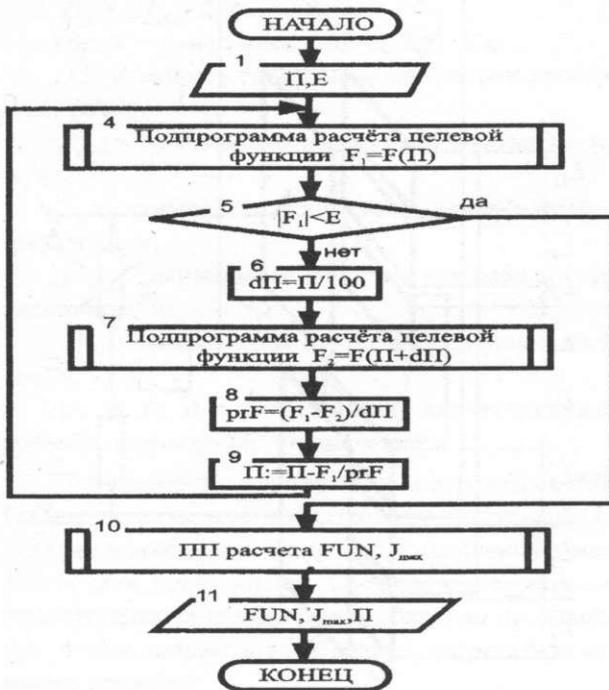


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета целевой функции с корректировкой мощности ЭЭН-Д методом Ньютона

оптимизации показывает, что она позволяет обеспечить снижение приведенных затрат на 10..15%. При этом их снижение достигается преимущественно за счет уменьшения стоимости терморегулятора, хотя материалоемкость электродного нагревателя ЭНУ несколько увеличивается. Предложенная технико-экономическая оптимизация позволяет также определить ЭНУ, для которых целесообразно использование предложенных ЭЭН-Д.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л.С. Попырин. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.
- 2 Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритм / Ж. Сеа. – М.: Мир, 1973. – 244 с.
- 3 Прищепов М.А. Моделирование характеристик емкостного электродного нагревателя-датчика для нагрева термолабильных сред / М.А. Прищепов, И.Г. Рутковский // Агропанорама, №6, 2004. – С. 15–22.

УДК 621.928.37

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ГИДРОЦИКЛОНА

Е.И. Мажугин, канд. техн. наук, доцент, А.Л. Казаков, ассистент (УО БГСХА)

К числу важнейших операций ремонтного производства относятся моечно-очистные операции. Эти операции повышают качество продукции и культуру ремонтного производства. Технология очистки деталей и агрегатов машин, применяемая в сельскохозяйственном ремонтном производстве, предусматривает широкое применение водных растворов синтетических моющих средств (СМС) в качестве очищающей среды. Растворы СМС по мере использования направляют в канализацию, что ведет к большой нагрузке на очистные сооружения и отрицательно сказывается на окружающей среде.

Одним из путей снижения вредного воздействия на окружающую среду отработавших свой срок растворов СМС является их технологическая очистка. Как показали исследования [1, 2], правильно организованная технологическая очистка помимо снижения техногенной нагрузки на окружающую среду позволяет уменьшить

расход воды и компонентов СМС, сократить затраты на обслуживание моечного оборудования, повысить культуру ремонтного производства и качество ремонта.

Одним из применяемых методов очистки растворов СМС является центробежный, осуществляемый с использованием сепараторов, центрифуг, гидроциклонов. Наиболее простым способом центробежной очистки является гидроциклонная очистка, так как гидроциклоны по сравнению с сепараторами и центрифугами проще по конструкции, менее энергоемки, проще в техническом обслуживании.

Важнейшей характеристикой гидроциклона является его производительность, которая используется при технологических и конструкторских расчетах, а также при расчете ожидаемых результатов тонкости очистки жидкости.

Производительность гидроциклона, то есть расход