

РОЗДІЛ «ТЕПЛОТЕХНІКА. ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»

УДК 658.26

КЛИМОВ Р.А., к.т.н., доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ПОДВОДА ТЕПЛОТЫ
НА ПРОЦЕССЫ ВСКИПАНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ СРЕД

Введение. Отличительной особенностью вскипания жидкости, находящейся в объеме другой, является наличие непрерывной фазы, которая в данном случае будет влиять на теплообмен с дисперсной фазой и паром. При этом происходит вскипание легкокипящего компонента смеси и быстрое нарастание паровой фазы. Созданные на основе принципа дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) промышленные аппараты, использующие этот эффект при эмульгировании и гомогенизации смесей в адиабатно вскипающих потоках, отличаются высокой производительностью и малыми затратами энергии [1, 2]. Но, несмотря на это, механизмы дробления дисперсных сред до сих пор окончательно не выяснены, что ограничивает совершенствование конструкции аппаратов [3]. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования [3-5] в большинстве своем предполагают гомогенное зародышеобразование паровой фазы, не учитывая при этом влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ), что не соответствует действительности, так как практически во всех эмульсионных средах присутствуют вещества, обладающие поверхностно-активными свойствами. Так, например, в эмульсиях типа вода-масло, где масло является дисперсной фазой, количество центров парообразования практически равно числу распределенных дисперсных частиц [2, 6]. Это указывает на то, что процесс зародышеобразования паровой фазы происходит гетерогенно, с заранее известным количеством центров парообразования. При этом формирование и рост паровой фазы будет происходить на границе раздела вода-масло из-за пониженного межфазного натяжения, т.к. масло является ПАВ по отношению к воде. Работы [2, 3, 7] предполагают появление парового пузырька внутри объема воды, а не на границе раздела фаз. Для более корректного описания роста паровой фазы применим модели [1, 4] с целью их дальнейшего усовершенствования.

Постановка задачи. Целью работы является создание математической модели роста паровой фазы при закипании эмульсии в результате резкого сброса давления, учитывающей изменение температуры несущей среды.

Результаты работы. Рассмотрим каплю воды радиусом R_1 , которая окружена паровой прослойкой толщиной δ_n , находящуюся в непрерывном объеме масла. Общий радиус частицы равен R_2 . Вся система в начальный момент времени находится при определенном давлении p и температуре T , которая соответствует температуре насыщения воды T_b ($T_b = f(p)$). В некоторый момент времени, следуя приведенной технологии, данная система оказывается в среде с пониженным давлением p_∞ . Вследствие этого вода становится пересыщенной относительно давления p_∞ , инициируются процессы парообразования на поверхности раздела вода-пар и роста границы раздела масло-пар (увеличение радиуса R_2).

Для описания процессов теплообмена между водой и паром, а также роста паровой фазы используем уравнения моделей [1, 4]. Для данных условий уравнение Релея имеет вид

$$\frac{dw_2}{d\tau} = \frac{p_n - p_\infty - 1.5\rho_m w_2^2 - \frac{2\sigma}{R_2} - \frac{4\mu_m w_2}{R_2}}{\rho_m R_2}. \quad (1)$$

Скорость радиального движения границы раздела фаз масло-пар

$$w_2 = \frac{dR_2}{d\tau}. \quad (2)$$

Температуру пара в любой момент времени можно определить из выражения

$$\frac{dT_n}{d\tau} = \frac{1}{c_n m_n} \left[Q - 4\pi c_n T_n \Delta m R_1^2 - \rho_n \frac{dV_n}{d\tau} \right]. \quad (3)$$

Интенсивность массопереноса при фазовом переходе и удельный тепловой поток между паром и поверхностью раздела вода-пар соответственно равны:

$$\Delta m = 0.25 \alpha_m [\rho_1 \cdot U_1(T_1) - \rho_n \cdot U_n(T_n)]; \quad (4)$$

$$q = 0.25 \rho_n c_n \cdot U_n(T_n) \cdot (T_1 - T_n) + \Delta m c_n T_1, \quad (5)$$

где $U(T)$ – среднеарифметическая скорость движения молекул пара при температуре T ;

α_m – коэффициент испарения.

Уравнение теплового баланса, позволяющее определить температуру границы раздела вода-пар T_1 ,

$$\frac{2\lambda_e}{R_1} (T_c - T_1) = q + \Delta m \cdot L(T_1), \quad (6)$$

где T_c – температура центра капли воды;

$L(T_1)$ – удельная теплота парообразования воды при температуре T_1 .

Уравнения для определения изменения во времени массы и плотности пара имеют вид

$$\frac{dm_n}{d\tau} = \Delta m \cdot 4\pi R_1^2, \quad \frac{d\rho_n}{d\tau} = \frac{1}{V_n} \left(\frac{dm_n}{d\tau} - \rho_n \frac{dV_n}{d\tau} \right), \quad (7)$$

где $V_n = \frac{4}{3} \pi [R_2^3(\tau) - R_1^3(\tau)]$.

Давление пара определяется как функция $p_n = f(T_n, \rho_n)$ по уравнению Редлиха-Квонга в модификации Вильсона [1].

Тепловой поток Q состоит из потока теплоты, который поступает со стороны жидкости (воды) или поступает в нее, а также потока теплоты, поступающего от масла:

$$Q = 4\pi (q R_1^2 + q_m R_2^2). \quad (8)$$

Удельный тепловой поток со стороны воды q определяется выражением (4), а для определения удельного теплового потока со стороны масла q_m используем интегральный метод решения нестационарных задач теплопроводности [4, 8]. Вводя параметр $\delta(\tau)$, называемый глубиной проникания, который характеризует переменную по времени толщину прилегающего к паровому объему слоя жидкости, где градиент температуры отличен от нуля, а также принимая профиль температуры по сечению данной толщины в приближении параболической интерполяции и условие $T_2(\tau) = T_n(\tau)$, для определенного момента времени получим

$$q_m = \lambda_m (T_m - T_n) \left(\frac{2}{\delta} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (9)$$

Глубина проникания δ равна [4]:

$$\delta = 2R_2 \left[\left(1 + \frac{3H}{4\pi R_2^3 \rho_m c_m (T_m - T_n)} \right)^{0.5} - 1 \right]. \quad (10)$$

Для определения функции $H(\tau)$ необходимо решить уравнение

$$\frac{dH}{d\tau} = 4\pi R_2^2 \lambda_m (T_m - T_n) \left(\frac{2}{\delta} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (11)$$

Температурное поле по сечению капли воды определяется уравнением

$$\frac{\partial T_g(r, \tau)}{\partial \tau} = a_g \left(\frac{\partial^2 T_g(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T_g(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad \tau > 0, \quad 0 < r < R_1, \quad (12)$$

при соответствующих начальных и граничных условиях

$$T(r, 0) = T_0 = const, \quad 0 < r < R_1; \quad -\lambda_g \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad T_m(\tau) = T_{m0}. \quad (13)$$

Температура T_1 на каждом временном шаге определяется из уравнения (5).

В процессе испарения воды затрачивается энергия как со стороны воды, так и со стороны масла, в результате чего температуры воды и объема масла будут снижаться, если не производить подвод теплоты в объем эмульсии. Изменение температуры объема масла T_m можно определить, зная общий объем системы, содержание в ней воды и масла, размер частиц дисперсной фазы, а также их количество. Пусть задан некоторый объем V_Σ , в котором находится 30% воды ($V_g = 0.3 \cdot V_\Sigma$) и 70% масла ($V_m = 0.7 \cdot V_\Sigma$). Для определения количества частиц дисперсной фазы можно воспользоваться гистограммами распределения частиц по размерам [1, 2]. Если принять, что вся дисперсная фаза будет равномерно распределена в объеме с частицами одинакового размера, то количество частиц дисперсной фазы (например, воды) равно:

$$N = \frac{3V_g}{4\pi R^3}. \quad (14)$$

Тогда изменение температуры масла во времени

$$\frac{dT_m}{d\tau} = 4\pi R_4^2 N \frac{q_m}{c_m m_m}, \quad (15)$$

где m_m – масса несущей фазы (масла) ($m_m = V_m \rho_m$).

Например, для объема эмульсии $V_\Sigma = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ с 30% воды (совместно с паром) и для частиц размером $R = 100 \text{ мкм}$ их число составляет $N = 3.58 \cdot 10^7$ шт.

Систему уравнений (1)-(15) решаем методом конечных разностей. Принимаем, что в начальный момент времени существует капля воды радиусом 100 мкм, окруженная паровой прослойкой толщиной 1 мкм, в непрерывной среде – масле. Вся система находится при температуре $t_0 = 180$ и 130°C при соответствующем давлении насыщения воды. В некоторый момент времени система оказывается в зоне пониженного давления ($p_\infty = 1 \text{ атм}$) относительно начального, в результате чего происходит испарение воды и рост паровой фазы. Результаты решения приведены на рис.1, 2.

Как видно из рис.1, а, снижение температуры масла происходит более интенсивно, чем снижение температуры центра капли воды T_c , что является следствием большей передачи теплоты от масла к пару, чем от центра капли воды к поверхности раздела вода-пар. Отличием в изменении температуры пара во времени является ее снижение вследствие уменьшения T_m по сравнению с расчетом без учета снижения температуры среды. При этом амплитудные значения скоростей роста (рис.2, б), ускорений движения, давлений практически не изменяются по сравнению с расчетом без изменения T_m .

Тепловой поток от масла к пару (рис.2, а) в начальный период времени равен такому же без учета $Q_m = f(T_m)$.

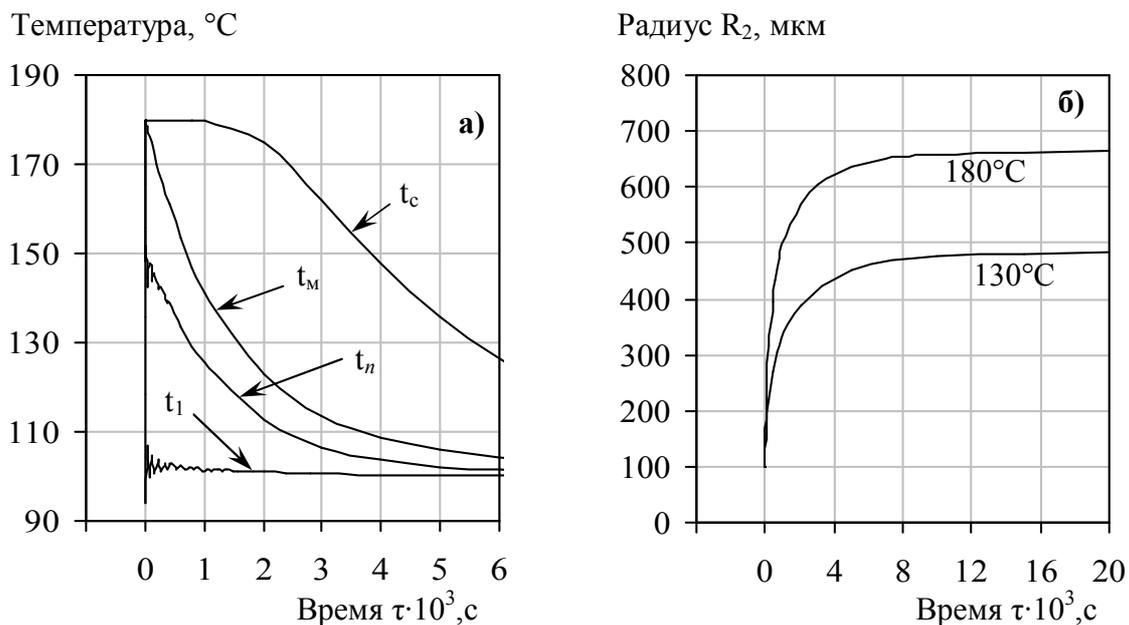


Рисунок 1 – Характер изменения температур поверхностей раздела, центра капли воды и масла во времени при начальной температуре $t_0 = 180^\circ C$ (а), а также радиуса границы раздела масло-пар при различных начальных температурах (б) во времени

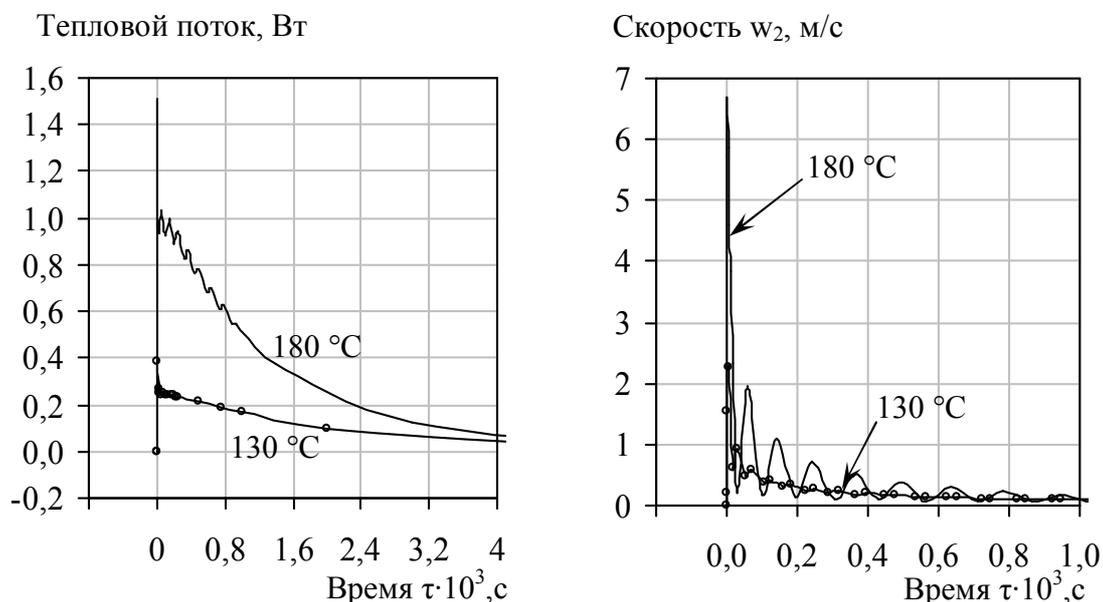


Рисунок 2 – Изменение теплового потока от масла к пару (а) и скорости движения границы раздела масло-пар (б) во времени

Но при существенном снижении T_m в дальнейшем они начинают снижаться, асимптотически приближаясь к нулю, что указывает на доминирующую роль теплового потока Q_m в процессе теплообмена. Максимальное расчетное значение Q_m достигает

≈ 1.5 Вт на одну частицу. Учитывая, что число частиц равно $N = 3.58 \cdot 10^7$, можно сделать вывод о том, что процесс теплообмена является высокоинтенсивным, требующим повышенного количества теплоты.

Характер изменения радиуса границы раздела масло-пар R_2 (рис.1, б) показывает такую закономерность: вначале бурный рост, но, достигнув определенного значения (для $t_0 = 180^\circ\text{C} \approx 680$ мкм), увеличивается незначительно, с малой скоростью ($w_2 \rightarrow 0$), что является следствием пониженного теплоподвода в частицу из-за снижения температуры масла.

Аналогичные закономерности проявляются и при температуре $t_0 = 130^\circ\text{C}$ (рис.1, 2). Проведенные расчеты для температур 180, 130 $^\circ\text{C}$ и начальных радиусов капель 10 и 500 мкм показали, что особенностью в изменении температур центра капли воды и масла при меньших начальных радиусах является то, что в начальный период времени температура масла снижается более интенсивно, чем температура центра капли воды T_c .

Выводы. В статье изучены процессы роста паровой фазы при закипании эмульсии в результате резкого сброса давления, учитывающие изменение температуры несущей среды. Модель роста паровой фазы без учета изменения T_m приводит в результатах расчетов к тому, что объем пара увеличивается, как следствие, растет радиус парового пузыря до того момента, пока вся вода не испарится. Представленная модель позволяет описать в более корректной постановке рост паровой фазы в присутствии масла как ПАВ с учетом формирования паровой фазы на границе раздела вода-масло. Модель роста паровой фазы с учетом изменения теплоподвода от масла с $T_m = \text{var}$ позволяет более точно рассмотреть и изучить процессы, происходящие при вскипании эмульсий. Динамические параметры границы раздела масло-пар в присутствии, например, трех частиц, причем одна из них находится между двумя другими, в условиях их неравномерного закипания могут привести к неустойчивостям Релея-Тейлора или Кельвина-Гельмгольца, в результате чего, вероятно, произойдет срыв парового объема и разрушение капли воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко А.М. Кинетика испарения в процессах гомогенизации / А.М.Павленко, Р.А.Климов, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – №6. – С.14-20.
2. Долинский А.А. Теплофизические процессы в эмульсиях / А.А.Долинский, А.М.Павленко, Б.И.Басок. – К.: Наукова думка, 2005. – 265с.
3. Иваницкий Г.К. Разрушение капель эмульсии в адиабатно вскипающих потоках // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т.21. – №4-5. – С.10-15.
4. Долинский А.А. Адиабатически вскипающие потоки / А.А.Долинский, Б.И.Басок, А.И.Накорчевский. – К.: Наукова думка, 2001. – 208с.
5. Шурчкова Ю.А. Анализ механизмов дробления капель при адиабатном вскипании и смешении дисперсных систем / Ю.А.Шурчкова, Т.В.Малишевский // Промышленная теплотехника. – 2000. – Т.22. – №1. – С.17-23.
6. Павленко А.М. Закономерности вскипания эмульгированных жидкостей / А.М.Павленко, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т.26. – №1. – С.21-25.
7. Долинский А.А. Дискретно-импульсная трансформация энергии в адиабатно вскипающем потоке / А.А.Долинский, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т.23. – №4-5. – С.5-20.
8. Гудмен Е. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // Проблемы теплообмена. – М.: Атомиздат, 1967. – С.41-96.

Поступила в редколлегию 06.06.2013.

Национальный горный университет, г. Днепропетровск

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА ПУТЕМ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Введение. Разделение мелкозернистых материалов традиционно выполняется в гравитационных аппаратах с горизонтальным движением несущего потока: горизонтальных классификаторах, дешламаторах, спиральных классификаторах, декантаторах, горизонтальных отстойниках и др. Исследования, выполненные в работе, позволили получить аналитическую зависимость для определения пройденного твердой частицей пути с возможностью построения траектории движения и обоснования конструктивных параметров горизонтального классификатора.

Постановка задачи. Выполнить теоретические исследования взаимодействия твердой частицы с несущим горизонтальным потоком при ламинарном обтекании и получить аналитическую зависимость для определения длины пути, пройденного твердой частицей в условиях гравитационного осаждения, учитывающую возможные сценарии относительного движения твердой частицы и жидкости.

Результаты работы. Характерными режимами движения твердых частиц в горизонтальном потоке пульпы являются:

- движение частицы с замедлением относительно несущего потока при постоянной и увеличивающейся скоростях его движения;
- движение частицы с ускорением относительно несущего потока при уменьшении скорости его движения;
- движение частицы со скоростью несущего потока.

Рассмотрим процесс перемещения элементарной частицы жидкости в составе горизонтального потока. В соответствии с методом Лагранжа текущая координата частицы является функцией исходной координаты и времени [1] (рис.1). Траектория движения частицы жидкости при плоском движении описывается системой уравнений

$$x = f_1(x_0, y_0, t);$$

$$y = f_2(x_0, y_0, t).$$

Известный метод рассматривает движение частицы жидкости за единицу времени dt со скоростью

$$U_x = \frac{dx}{dt};$$

$$U_y = \frac{dy}{dt}.$$

Проекция текущей координаты частицы жидкости на оси x , y описывается системой уравнений в виде

$$dx = U_x dt;$$

$$dy = U_y dt.$$

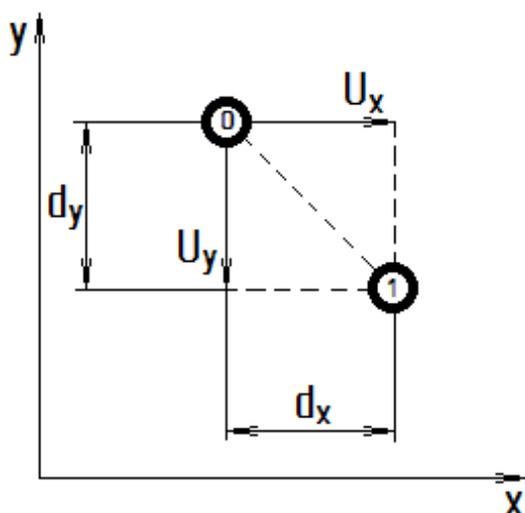


Рисунок 1 – Схема процесса движения частицы жидкости под действием горизонтального потока

Решая приведенную систему на плоскости, получим

$$dt = \frac{dx}{U_x} = \frac{dy}{U_y},$$

откуда общий вид зависимости для определения координаты точки на плоскости примет вид

$$x = \int \frac{U_x}{U_y} dy + C. \quad (1)$$

Применим метод Лагранжа для описания процесса движения твердых частиц, взвешенных в жидкости, движущейся горизонтально (рис.2). Пусть твердая частица движется под действием горизонтального ограниченного потока жидкости попутно ему. Горизонтальная проекция вектора скорости твердой частицы направлена попутно движению жидкости. Горизонтальное движение твердой частицы характеризуется ее массой в жидкости m , возбуждающей силой скоростного напора $F_{ск}$ при скорости движения несущей среды U_x и силой сопротивления P при скорости движения твердой частицы относительно потока несущей среды v_x (рис.2):

$$m \frac{dU_x^4}{dt} = F_{ск} - P.$$

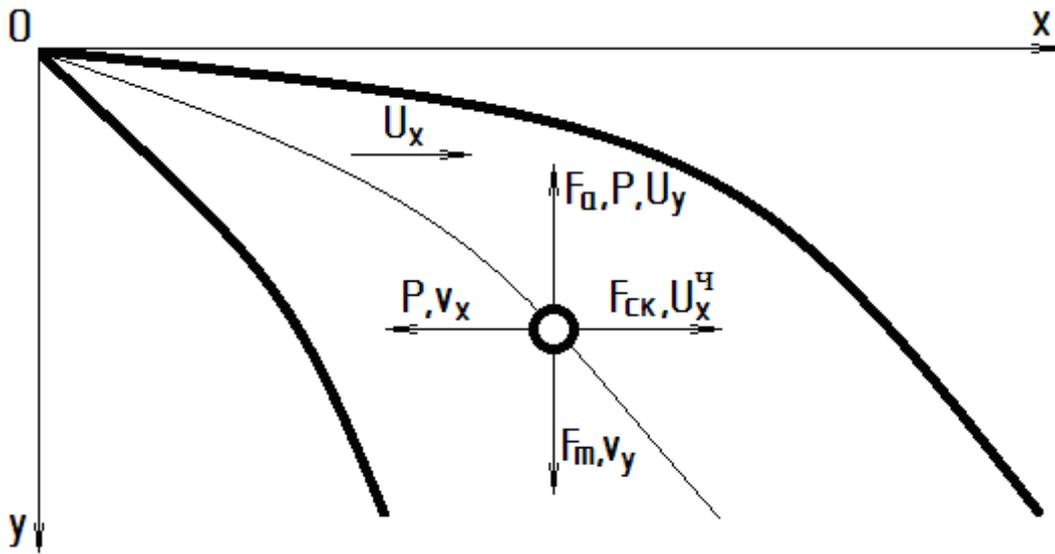


Рисунок 2 – Схема процесса движения твердой частицы в горизонтальном потоке жидкости

Уравнение горизонтального движения твердой частицы примет вид

$$(\rho_m - \rho_n) \frac{\pi d^3}{6} g \frac{dU_x^4}{dt} = C_\phi \frac{\pi d^2}{4} \rho_n \frac{U_x^2}{2} - C_\phi \frac{\pi d^2}{4} \rho_n \frac{v_x^2}{2}.$$

После преобразований уравнение движения примет вид

$$U_x^4 = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C_\phi}{dg} \right) \int (U_x^2 - v_x^2) dt + C. \quad (2)$$

Постоянная интегрирования C определяется как начальная скорость движения твердой частицы U_{x0}^c .

Проанализируем полученную зависимость и рассмотрим три режима движения твердой частицы относительно несущей среды.

Пусть твердая частицы неподвижна, то есть $U_x^c = 0$. В этом случае скорость движения жидкости относительно твердой частицы U_x равна скорости перемещения твердой частицы относительно жидкости v_x :

$$U_x = v_x. \quad (3)$$

Попутное движение твердой частицы и несущего потока может протекать в диапазоне $U_x > v_x \geq 0$, при этом уравнение движения (2) примет вид:

$$U_x^c = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C\phi}{dg} \right) \int (U_x^2 - v_x^2) dt + C \quad \text{при } U_x^c < U_x;$$

$$U_x^c = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C\phi}{dg} \right) \int (U_x^2 + v_x^2) dt + C \quad \text{при } U_x^c > U_x; \quad (4)$$

$$U_x^c = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C\phi}{dg} \right) \int (U_x^2) dt + C \quad \text{при } U_x^c = U_x, v_x = 0.$$

Встречное движение твердой частицы и несущего потока характеризуется режимом движения $U_x < v_x$, при этом уравнение движения сохранит вид (2).

Графическое представление данного процесса при отсутствии относительного движения несущего потока и твердой частицы в исходном сечении, то есть $U_{x0}^c = U_{x0}, v_{x0} = 0$, изображено на рис.3.

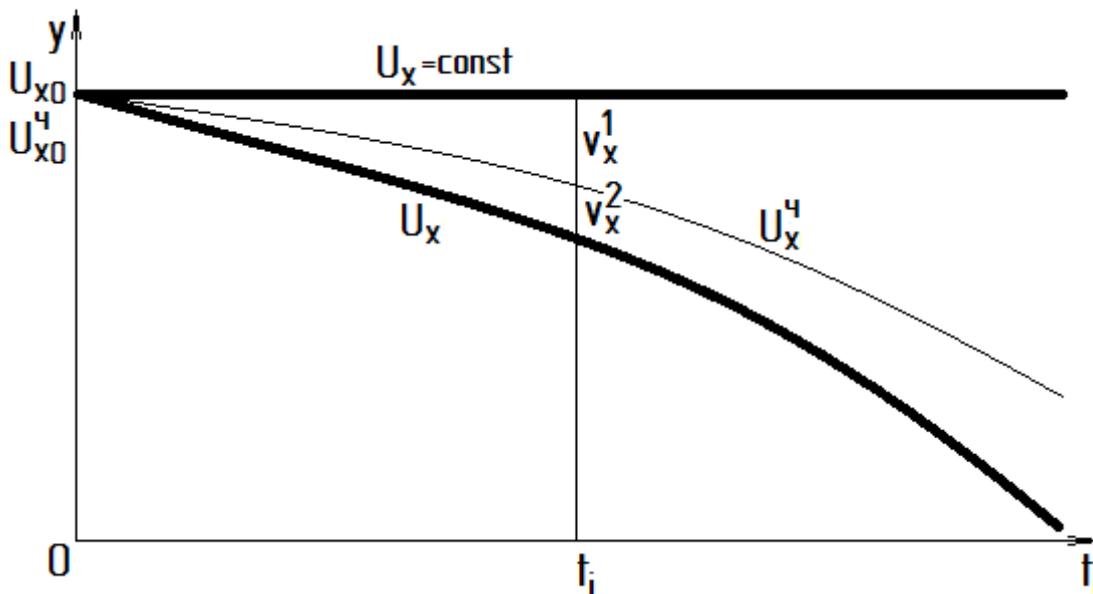


Рисунок 3 – Схема процесса попутного движения твердой частицы и горизонтального потока жидкости

Анализ процесса показывает, что в пределах времени t функция U_x^u ограничена функциями $U_x = const$ и U_x . Скорость движения твердой частицы в i -том сечении относительно горизонтального потока несущей среды, движущегося с постоянной скоростью, принята в виде v_{xi}^1 , а относительно замедляющегося потока – v_{xi}^2 (рис.3).

Графическое представление данного процесса построено на базе следующей гипотезы. Несущий поток движется в ламинарном режиме. На участке времени t при постоянной скорости несущей среды твердая частица может двигаться с относительным замедлением, то есть $U_x = const \geq U_{xi}^u$. При замедлении несущего потока твердая частица может двигаться с относительным ускорением $U_{xi}^u \geq U_{xi}$, то есть функция скорости твердой частицы находится в пределах $U_x = const \geq U_{xi}^u \geq U_{xi}$.

Теоретическое обоснование процесса взаимного перемещения твердых частиц и несущего горизонтального потока весьма затруднительно. Рациональным и более информативным методом моделирования процесса, в узкой обозначенной области, можно считать экспериментальное изучение, которое позволит определить значения относительных скоростей v_{xi}^1, v_{xi}^2 .

Одним из важных факторов, оказывающим влияние на процесс относительного движения твердой частицы в несущем потоке, является форма частицы. Однако в обозначенной области скоростей движения и крупностей, характеризуемых числом Re , наблюдается режим движения твердой частицы, близкий к ламинарному, при котором в соответствии с диаграммами Релея [2] форма частицы оказывает несущественное влияние на ее движение.

Вертикальная проекция вектора скорости твердой частицы характеризуется процессом осаждения и определяется абсолютной величиной веса частицы в жидкой среде и силой сопротивления среды, направленной в сторону, противоположную направлению движения (рис.2):

$$F_m - F_A = P,$$

где F_m – сила тяжести, Н;

F_A – сила Архимеда, Н;

P – сила сопротивления, Н.

Известно, что процесс равномерного падения твердой частицы в жидкости описывается уравнением

$$(\rho_{тв} - \rho_{ж}) \frac{\pi d^3}{6} g = C_{\phi} \frac{\pi d^2}{4} \rho_{ж} \frac{v_y^2}{2},$$

где $\rho_{тв}$ – плотность твердой частицы, кг/м³;

d – диаметр твердой частицы, м

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости (пульпы), кг/м³;

C_{ϕ} – коэффициент лобового сопротивления твердой частицы;

v_y – вертикальная составляющая скорости движения твердой частицы относительно жидкости, м/с.

Скорость вертикального движения частицы можно определить по известной формуле

$$v_y = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_{\phi}} \frac{(\rho_{тв} - \rho_{ж})}{\rho_{ж}} g d}.$$

Ввиду традиционности применения сырья с большим содержанием окатанных частиц кварца (рудные и нерудные пески) исследуемая область крупности $0,15 < d < 5$ мм оказалась наиболее изученной экспериментально. В литературных источниках приводятся данные разных авторов, получивших экспериментальные значения скорости свободного падения частиц кварца [2, 3]. Таким образом, ввиду наличия достаточного количества экспериментального материала в дальнейших исследованиях конечная скорость падения частиц кварца будет приниматься по известным в литературе экспериментальным данным. Следует также отметить, что при обозначенных скоростях движения несущего потока время процесса осаждения намного превышает время неустановившегося движения твердой частицы, поэтому этот фактор в модели не учитывается.

При учете относительного перемещения твердой частицы, движимой горизонтальным потоком несущей среды, в горизонтальном и вертикальном направлениях формула (1) приобретет вид

$$x = \int \frac{U_x \pm v_x}{U_y - v_y} dy + C.$$

Заменим параметр, учитывающий относительное вертикальное перемещение, экспериментальным значением скорости падения твердой частицы в воде

$$U_y - v_y = \omega,$$

где ω – экспериментальное значение скорости свободного падения твердой частицы, м/с.

Постоянная интегрирования C характеризует начальные условия движения твердой частицы, и при расположении начала координат в начальном положении твердой частицы постоянная $C = 0$.

Предположим, что движение жидкости и твердой частицы протекает без взаимного перемещения, то есть $v_x = 0$. Таким образом, упростим рассмотрение процесса и приравняем горизонтальную проекцию скорости твердой частицы и скорость жидкости $U_x^y = U_x$. Тогда уравнение движения твердой частицы под действием горизонтального потока примет вид

$$x = \frac{U_x}{\omega} y.$$

Выводы. Результаты проведенных исследований взаимодействия твердой частицы с несущим горизонтальным потоком при ламинарном обтекании позволяют сделать следующие выводы:

1. Основой для теоретического описания гравитационного осаждения твердой частицы при ее попутном и встречном движении относительно горизонтального потока несущей среды явился метод Лагранжа.

2. При скорости движения жидкости U_x , а скорости перемещения твердой частицы относительно жидкости v_x абсолютная скорость твердой частицы U_x^y при попутном движении с несущим потоком может находиться в диапазонах: 1 – $U_x^y < U_x$; 2 – $U_x^y > U_x$; 3 – $U_x^y = U_x, v_x = 0$.

3. Получена зависимость для определения пути, пройденного твердой частицей в условиях гравитационного осаждения под действием горизонтального несущего потока, которая учитывает возможные сценарии относительного движения твердой частицы и жидкости.

4. При условии отсутствия взаимного перемещения твердой частицы и горизонтального потока полученная зависимость может быть использована для построения

траектории движения и обоснования конструктивных параметров горизонтального классификатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гейер В.Г. Гидравлика и гидропривод: учебник для вузов / В.Г.Гейер, В.С.Дулин, А.Н.Заря: – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 331с.
2. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения / Лященко П.В. – М.-Л.: Гос-топтехиздат, 1940.
3. Справочник по горнорудному делу. Т. 1. Открытые работы. – М.: Гос. научно-техн. издат. литерат. по горному делу, 1960.–926с.

Поступила в редколлегию 27.06.2013.

УДК (620.9 + 553.982.2):66(063):005:53

ТУЧИН В.Т., инженер
ДОЛГОПОЛОВ И.С., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор
ТИЩЕНКО Н.Т.,* директор
БЕЗШТАНЬКО Р.В. аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет
*ООО Научно инновационное предприятие “ДІЯ”, г. Днепродзержинск

СТРАТЕГИЯ И ТАКТИКА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ (ЧАСТЬ 1)

Введение. Решение проблемы энергоресурсосбережения неразрывно связано с проблемой повышения энергоэффективности. При этом стратегической концепцией энергоресурсосбережения является концепция системного анализа проблемы на разных иерархических уровнях: нано-, микро-, мезо-, макро- и мегамасштабе [1-4].

В предлагаемой работе рассматриваются результаты исследований по обобщению и развитию системного подхода и топологических методов в моделировании современных систем с целью получения комплексной (параметрической, эксергетической и эксергоэкономической) картины процессов преобразования вещества и энергии в них при стационарных и динамических режимах.

Постановка задачи. Основными задачами работы являются: формулирование теоретических основ, стратегических и методологических принципов системного анализа энергоресурсосбережения физико-технологических систем (ФТС); разработка критериев эксергетической эффективности ФТС, позволяющих провести анализ энергетической эффективности технологий и оборудования; качественный анализ физико-технологической системы и разработка её обобщенной эксергодиссипативной функции; введение в систему фундаментальных уравнений ФТС эксергетического и экономического аспектов; разработка формализма топологическo-эксергетического и топологическo-экономического подхода при моделировании ФТС; представление функциональных операторов ФТС; определение устойчивости и идентификация ФТС; выбор термодинамических принципов управления энергоресурсосбережением ФТС. Методология решения этих задач рассмотрена в двух частях работы.

Результаты работы. В основе разрабатываемого метода повышения энергетической эффективности и энергоресурсосбережения в технических системах лежит прин-

цип системного подхода к анализу отдельного процесса технологии как сложной кибернетической системы, определяемой как физико-технологическая система (ФТС) [5, 6].

Это понятие раскрывает особенности реальной системы, необходимое для анализа энергоресурсосбережения. В нем учтено энергетическое взаимодействие системы с внешней средой; отражены фундаментальные законы сохранения (например, законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, массы, электрического заряда); представлены информационные и экономические аспекты функционирования системы.

Стратегия системного подхода в энергоресурсосбережении – это принципы достижения конечной цели исследований и разработок – создания высокоэффективных энергоресурсосберегающих, экономически эффективных, экологически совершенных и устойчиво развивающихся ФТС. Эта стратегия отражена в разрабатываемых нами научных основах системного анализа энергоресурсосбережения, где в качестве базового инструмента реализации конкретных задач предложен топологоэксергетический метод анализа ФТС [5-8].

Системный подход к решению задач энергоресурсосбережения ФТС основан на последовательном выполнении семи стратегических принципов, которые систематизируют все этапы получения математического описания физико-технологической системы, отражающие параметрическую, эксергетическую и эксергоэкономическую стороны функционирования ФТС. Направление исследований заключается в конкретном представлении каждого из этапов стратегии, а также в создании топологоэксергетического и топологоэксергоэкономического методов описания ФТС, позволяющих вскрыть теоретическое единство параметрических, эксергетических и эксергоэкономических взаимосвязей. Три из семи принципов рассматриваются в первой части работы.

1. Формулировка цели исследования, постановка задачи по реализации цели исследований и определение критериев эффективности решения задачи.

В работе используются как известные критерии эксергетической эффективности, так и введенные в процессе разработки топологоэксергетического метода статические и динамические критерии эксергетической и экономической эффективности ФТС, основанные на использовании обобщенных эксергодиссипативной и эксергоэкономической диссипативных функций [9].

1.1. Методологические подходы к анализу эффективности ФТС. В системном анализе и, в частности, в теории эффективности в настоящее время существует два методологических подхода к анализу эффективности систем: **первый подход** основан на построении некоторого обобщенного показателя эффективности системы с использованием специальных процедур свертки её частных целевых показателей [10], либо определении функций полезности и задании предпочтения на множестве целевых показателей с использованием оценки важности, в том числе с помощью нечётких отношений; **второй подход** состоит в построении для исследуемой системы показателя, который характеризует её функциональные возможности с позиции достижения целей функционирования вышестоящей надсистемы.

Из теорем Геделя [10] следует важный методологический принцип, который формулируется как «**принцип внешнего дополнения**»: для получения истинного суждения ФТС необходимо рассмотреть внешнее дополнение к этой системе с расширенным набором операций логического вывода. Данный принцип следует считать основополагающим принципом системного анализа как современной методологии исследования сложных ФТС.

Существует ещё один подход, получивший название **многокритериальный** и использующий процедуру построения множества несравнимых (недоминируемых) вариантов систем по значению вектора целевых показателей [10]. Таким образом, сравнивая между собой три различных подхода, мы можем установить, что все они реали-

зуют принцип «внешнего дополнения» и с методологической точки зрения обеспечивают получение вполне объективной оценки эффективности исследуемой подсистемы. Выбор того или иного подхода зависит от характера задачи, уровня её информационного обеспечения и владения исследователем определёнными инструментальными средствами системного анализа.

1.2 Принципы повышения энергетической эффективности для реализации энерго-сбережения ФТС. Анализ энергоресурсосберегающих ФТС с энергетических позиций позволил обобщить подходы и сформулировать основные принципы повышения энергетической эффективности и энергосбережения ФТС [5]: 1 – *понижение требуемого эксергетического потенциала, диверсификация источников энергии*; 2 – *максимальное использование энергетического потенциала в ФТС*; 3 – *минимизация необратимостей разрабатываемых и функционирующих ФТС*; 4 – *использование синергетических эффектов в энергетической самоорганизации ФТС.*

1.3 Критерии оценки эффективности энергоресурсосбережения. Критерии эффективности оценки энергоресурсосбережения отражают характеристики целей, заданные количественно, и характеризуют качество функционирования ФТС. Эффективность энергоресурсосбережения можно оценить на основании следующих показателей:

1 – **ОТД – критерия**, позволяющего выразить эксергетические потери в долях от всех видов эксергий (механической, тепловой, электрической, химической и т.д.), поступающих на вход ФТС. При этом ОТД - критерий зависит от конструктивно-технологических параметров анализируемых и синтезируемых систем [5];

2 – **ТД – критерия**, показывающего отклонение реального производства потерь эксергии от суммы обобщенных модифицированных функций рассеяния Рэля [5];

3 – **аналитического выражения принципа локального экстремума** из обобщенной модифицированной функции Дьярмати [5]. Этот принцип является локальным дифференциальным принципом наименьшего рассеяния эксергии, который должен соблюдаться в каждой точке рассматриваемого пространства изменения состояния системы;

4 – **модифицированной формы интегрального принципа Дьярмати** – это принцип объединяет принципы наименьшего рассеяния эксергии и принцип наименьшего производства потерь эксергии [5];

5 – **коэффициентов интенсивности η_N и эксергетических потерь η_{Π}** [5, 11]. Коэффициент интенсивности η_N показывает долю полезно затраченной эксергии N по отношению к сумме полезно затраченной и потерянной Π эксергии в процессе. Коэффициент эксергетических потерь показывает отношение эксергии Π , потерянной в системе, к эксергии на входе в систему $E_{вх}$;

6 – **эффективность преобразования и транспорта энергии оценивают эксергетическим к.п.д. η_e** [5];

7 – **обобщенный критерий эффективности – к.п.д. по эксергии – нетто – η_{Σ}** [11];

8 – **значений временных динамических показателей:** T_p – времени выхода на режим; $T_{ост}$ – времени остановки; T_{Π} – времени установления переходных процессов. В этих случаях решается задача обеспечения следующих условий: $\min T_p$; $\min T_{ост}$; $\min T_{\Pi}$;

9 – **критерия надёжности**, оценивающего надёжность ФТС при её разработке и эксплуатации, определяемого соотношением

$$R = T_1 / (T_1 + T_2),$$

где T_1 , T_2 – соответственно время работы ФТС без аварий и время аварийного ремонта;

10 – **критериев, характеризующих качество работы САУ ФТС:**

$$\min \sum (\bar{X} - X)^2; \min X_{\max},$$

где \bar{X} , X – вектор параметров состояния системы, который необходимо поддерживать на требуемом уровне, и его действительное значение; X_{\max} – максимальное значение вектора \bar{X} .

11 – технико-экономических критериев эффективности ФТС:

а) критерий приведенных затрат \bar{Z} , определяемый зависимостью

$$\bar{Z} = \frac{Z}{W \cdot T} = \bar{\Theta} + \frac{\Psi \cdot K}{W \cdot T},$$

где Z – суммарные затраты; W – производительность системы в единицу времени по конечному продукту; T – время работы установки в году; $\bar{\Theta}$ – эксплуатационные затраты; Ψ – коэффициент эффективности капиталовложений; K – капитальные затраты;

б) экономическая оценка энергосбережения ФТС может быть проведена с помощью коэффициента экономической эффективности энергоресурсосбережения, представляющего собой отношение прибыли (экономии) от проведения энергоресурсосберегающих мероприятий к стоимости их проведения [5]. Расчет этого показателя подразумевает учет не только прямой экономии энергии и ресурсов, но и сопутствующих эффектов, в том числе изменения объема вредных выбросов в окружающую среду за счет затрат на очистные мероприятия и экологические штрафы.

2. Задание ограничений при достижении заданной цели в системном анализе ФТС (введение геометрической информации в топологоэксергетическом моделировании).

2.1. Конкретизация топологоэксергетического описания.

Топологоэксергетическая структура связи представляет наглядное и компактное топологическое описание ФТС, однако для эффективного использования в алгоритмах переработки информации на ЭВМ такое описание должно содержать информацию о параметрах элементов эксергетических связанных диаграмм, начальных и граничных условиях, мощностях источников (стоков) субстанций. Для односвязных элементов в линейных системах вид параметра и его численное значение указываются в скобках под символом элемента, над ним или в отдельной таблице спецификации элементов [4, 8].

Для нелинейных систем здесь же может быть указан тип нелинейной функциональной зависимости.

Учёт информации о начальных значениях e - и f -переменных на топологоэксергетических структурах связи для C - и I -элементов соответствует принятой ранее индексации связей. Значение $e(0)$ записывается над полустрелкой связи (или слева от неё при вертикальном положении), значение $f(0)$ записывается под полустрелкой связи (или справа от её вертикального положения).

Специфика операторных элементов ($K, P, D, \nabla, C_n, C_m, C_v$) требует учёта граничных условий [4, 8]. Численное решение краевых задач предполагает переход от операторных элементов к конечно-разностным аппроксимационным соотношениям или применение метода конечных элементов. В терминах топологоэксергетических структур связи это эквивалентно переходу от локальных диаграмм с инфинитезимальными операторными элементами к диаграммным сетям, построенным из элементов со сосредоточенными параметрами. При этом учёт граничных условий сводится к заданию условий для параметров тех элементов диаграммной сети, которые представляют границы области интегрирования краевой задачи. Формализация записи краевых условий на пограничных элементах диаграммной сети аналогична формализации записи начальных условий.

2.2. Метод автоматизированного учёта геометрической информации при топологоэксергетическом описании ФТС.

Учет геометрической информации о моделируемом объекте необходим при постановке граничных условий в областях сложной конфигурации; при описании пространственно-геометрических форм областей, занимаемых сплошной средой; при описании характера распределения источников (стоков) энергии, массы, импульса, заряда внутри системы и т.п. Разработана методика автоматизированного учета геометрической информации [4, 12], которая строится на основе компактности и наглядности метода логико-алгебраических операций и топологического принципа описания физико-технологических систем (ФТС). Это решает задачу повышения эффективности топологоэксергетического метода (метода графов связи) при описании ФТС, так как выбор и уточнение геометрической информации об объекте производится на стадии формирования уравнений математической модели. Такая информация обуславливается существующим или проектируемым аппаратурным оформлением технологического процесса.

3. Качественный анализ энергетической, эксергетической и экономической структур ФТС.

Стратегия системного подхода к моделированию, анализу и синтезу энергоресурс-собирающего процесса [5, 8] на третьем этапе определяет **качественный анализ структуры** ФТС и выделяет два направления: **смысловой**, т.е. заранее осмысливание изначальной информации о физико-химических и энергетических (эксергетических) особенностях процесса, и **математический**, т.е. качественный анализ структуры математических зависимостей, описывающих ФТС.

Рассмотрим **первое направление** качественного анализа структуры **ФТС**. Представляя ФТС как большую систему, можно реализовать её в виде совокупности элементов и связей. Формализация элемента осуществляется в виде отдельного физического, химического, энергетического (эксергетического) или др. эффекта. Причинно-следственные отношения цепью связывают между собой эффекты. Совокупность элементов и связей образует структуру системы. Установление структуры связей между различными эффектами ФТС означает вскрытие структуры физико-технологической системы [5-9]. Особенность исследуемых систем состоит в том, что совокупность явлений, составляющих ФТС, носит двойственную (детерминировано-стохастическую) природу, состоящую в наложении стохастических особенностей гидродинамики на процессы массо- и теплопереноса, химического и энергетического (эксергетического) взаимодействия. А это, в свою очередь, объясняется случайным взаимодействием фаз или случайным характером граничных условий в ФТС.

Визуализация, компактность и информационная ёмкость представления этого материала предполагает использование языка направленных графов. Для такого анализа строятся диаграммы взаимных влияний физических, энергетических (эксергетических), химических и др. эффектов ФТС, где узлам диаграммы соответствуют отдельные явления или эффекты в системе, а ориентированным дугам – соответствующие причинно-следственные связи между ними [3, 5-9].

С позиции энергоресурсосбережения важно знать, на что расходуются ресурсы и энергия (эксергия), подводимая к ФТС. Все характерные виды энергозатрат (эксергозатрат) на реализацию необратимых процессов в системе характеризует обобщённая эксергодиссипативная функция физико-технологической системы (**ОЭДФ ФТС**). Разложение **ОЭДФ ФТС** на движущие эксергетические усилия и потоки приведено в работах [6-9] и является основой при построении комплекса процедур автоматизированного формирования математических моделей в соответствии с топологоэксергетическим принципом формализации ФТС.

Эксергоэкономические обобщенные переменные усилия и потоки, участвующие в описании картины поведения эксергоэкономических потоков в системе, представлены в табл.1.

Таблица 1 – Обобщенные переменные в топологоэксергоэкономическом методе для всех форм энергии, представленных в работе [9]

Форма энергии	Обобщенная переменная усилия	Обобщенная переменная потока
Все формы энергии таблиц 1 и 2	Удельная цена эксергии потока $c^{эк}$, (Грн/Дж)	Поток эксергии во времени $\dot{I}^{эк}$, (Дж/с)

Основные концепции рационального использования материальных и энергетических ресурсов при анализе и синтезе ФТС были определены ранее [13]. Они базируются на системном анализе проблемы на различных иерархических уровнях, а именно: нано-, микро-, мезо-, макро- и мегамасштабе.

Рассмотрим **второе направление** качественного анализа структуры ФТС – **математический аспект**. Обобщенная система гидромеханических уравнений с учётом физико-химических и эксергетических особенностей процессов, протекающих в анализируемом объекте, составляет основу структурного анализа ФТС. Такая замкнутая система уравнений сформулирована в работе [14] и может: а) вскрыть структуру движущих (эксергетических) сил и потоков, развивающихся в локальном объёме ФТС и отражающих специфику изменения энергии (эксергии) физико-химических процессов в нём; б) служить отправной точкой при переходе к математическому описанию инженерной задачи.

Базовой теоремой топологоэксергетического метода является теорема Телледжена, трансформированная авторами для разрабатываемого подхода [15]. Основные этапы формирования математической модели физико-технологической системы на основе диаграмм связи и топологоэксергетических структур связи представлены в алгоритме на рис.1.

Выводы.

1. В работе сформулированы теоретические основы системного анализа энергоресурсосбережения физико-технологических систем.
2. Разработаны стратегические принципы, систематизирующие все этапы получения математического описания физико-технологической системы, отражающие параметрическую, эксергетическую и эксергоэкономическую стороны функционирования ФТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы интеграции тепловых процессов / [Р.Смит, Й.Клемеш, Л.Л.Товажнянский и др.]. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 456с.
2. Rosen M.A. Exergy and government policy: Is there a link? / M.A.Rosen // Exergy, an International Journal. – 2002. – №2. – P.224-226.
3. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В.Кафаров, И.Н.Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 500с.
4. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации / В.В.Кафаров, И.Н.Дорохов. – М.: Наука, 1979. – 394с.

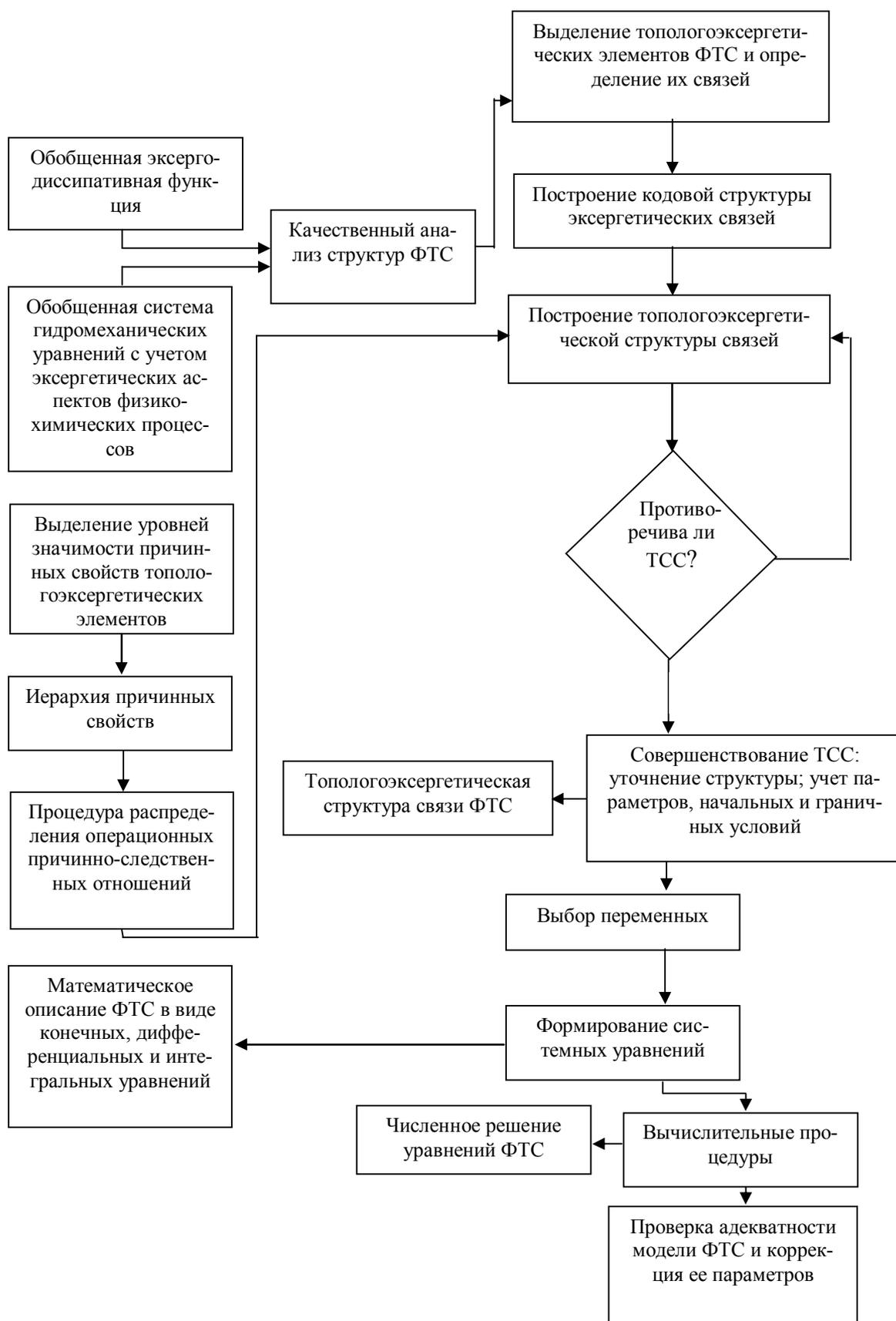


Рисунок 1 – Основной алгоритм формирования математической модели ФТС

5. Долгополов И.С. Принципы энергосбережения физико-технологических систем и основные направления их реализации (топологоэксергетический подход) / И.С.Долгополов, В.Т.Тучин // Математичне моделювання. – 2007. – № 4(22). – С.45-51.
6. Долгополов И.С. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем / И.С.Долгополов, В.Т.Тучин // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 24. – С.116-118.
7. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод моделирования физико-технологических систем (ФТС). 5 Minsk International Heat and Mass Transfer Forum Proceedings. MIF 2004 ММФ ?????
8. Тучин В.Т. Основы формализма топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем / В.Т.Тучин, И.С.Долгополов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2006. – С.202-212.
9. Эксергоэкономический анализ физико-технологических систем (топологоэксергетический подход). Часть 1, 2 / В.Т.Тучин, И.С.Долгополов, А.В.Садовой, А.М.Касимов // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов: XVIII Междунар. науч.-практ. конф., ????? : сборник научных статей в 2-х. Т.1. / УкрГНТЦ «Энергосталь»-Харьков: Райдер, 2010. – С.242-251.
10. Буравлёв А.И. Принцип внешнего дополнения и его применение при оценке эффективности сложных систем / А.И.Буравлёв, Г.И.Горчица // Труды ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского. – 2009. – №32. – С.14-16.
11. Янтовский Е.И. Оценка эффективности энергетических объектов / Е.И.Янтовский, В.С.Варварский, А.П.Островский // Промышленная теплотехника. – 1984. – Т. 1, № 6. – С.95-101.
12. Тучин В.Т. Метод автоматизированного учета геометрической информации при топологическом моделировании физико-химических систем / Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбачевич Л.Л. – М., 1978. – ????? – Деп. в ВИНТИ дата № 1274 -78 (78), №9, б/о №540, 1978.
13. Устойчивое развитие физико-технологических систем (стратегия системного подхода, эксергия и окружающая среда). Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов / [В.Т.Тучин, И.С.Долгополов, А.В.Садовой и др.] // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов: XVIII Междунар. науч.-практ. конф., ????? : сборник научных статей в 2-х. Т2 . УкрГНТЦ «Энергосталь». - Харьков: «Издательство Сага», 2009.- С.77-81.
14. Долгополов И.С. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС / И.С.Долгополов, А.В.Никулин, В.Т.Тучин // Системні технології. – 2003. – № 6(29). – С.64-68.
15. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода описания физико-технологических систем (ФТС). Часть 1 / Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2004. – № 4. – С.81-89.

Поступила в редколлегию 01.07.2013.