

Топологоэксергетический анализ гидродинамики аппарата фонтанирующего слоя (стационарный режим)

И.С. ДОЛГОПОЛОВ, В.Т. ТУЧИН, О.А. ШРАМКО

Днепродзержинский государственный технический университет

На основании топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем (ФТС) получена математическая модель гидродинамики аппарата фонтанирующего слоя (АФС), описывающая стационарный режим его работы. Определено влияние конструктивно-технологических параметров на эксергетическую эффективность функционирования АФС.

На основі топологоексергетичного методу моделювання фізико-технологічних систем (ФТС) отримана математична модель гідродинаміки апарату фонтануючого шару (АФС), яка описує стаціонарний режим його роботи. Визначено вплив конструктивно-технологічних параметрів на ексергетичну ефективність функціонування апарату.

The mathematical model of spouted bed device hydrodynamics is received, describing a stationary mode of spouting on the basis of topologyexergycal method. The influence of constructive - technological parameters on exergycal efficiency of apparatus is considered.

Введение. Среди методов взаимодействия фаз во многих гетерогенных процессах фонтанирующий слой (ФС) занимает особое место, которое обусловлено признанием за ним целого ряда неоспоримых преимуществ, таких как: организованное циркуляционное движение материала; отсутствие газораспределительного устройства; возможность перерабатывать крупные твердые частицы, полидисперсные материалы, агрессивные среды; осуществлять процессы при высоких температурах; обрабатывать слипающиеся, агломерирующиеся и спекающиеся материалы. При этом для многих процессов подчеркивается большая интенсивность работы АФС по сравнению с установками кипящего слоя [1,2]. Впервые ФС был описан в 1955 г. Тем не менее, его использование в промышленной практике имеет ограниченное применение по сравнению с кипящим или движущимся слоями.

Это связано с отсутствием методик расчета промышленных АФС, обусловленным сложностями в математическом описании процессов, происходящих в ФС. При этом недостаточное внимание уделяется теоретической и практической оценке энергетической эффективности АФС в технологических процессах. Не разработана методика эксергетического анализа АФС с точки зрения энергосбережения.

Постановка задачи. Наиболее широко АФС используется для сушки дисперсных материалов.

Сложный комплекс гидродинамических, тепловых и массообменных процессов вызывает определенные трудности при моделировании таких систем и оценке их энергетической эффективности с точки зрения энергосбережения. Данная статья является частью работы, цель которой состоит в получении математических моделей, отражающих картину энергетических преобразований комплекса гидродинамических процессов (стационарный режим) в сушильном АФС. Эта задача решается с позиции системного подхода на основании топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем, разрабатываемого авторами [3-5].

Применение рассматриваемого метода позволит оценить энергетическую эффективность АФС и проследить связь его конструктивно-технологических характе-

ристик с затратами эксергии на реализацию процессов в нем с позиции энергосбережения.

Методика решения. В работе рассматривается гидродинамика АФС, представленного на рисунке 1. В качестве ожижающего агента используется воздух.

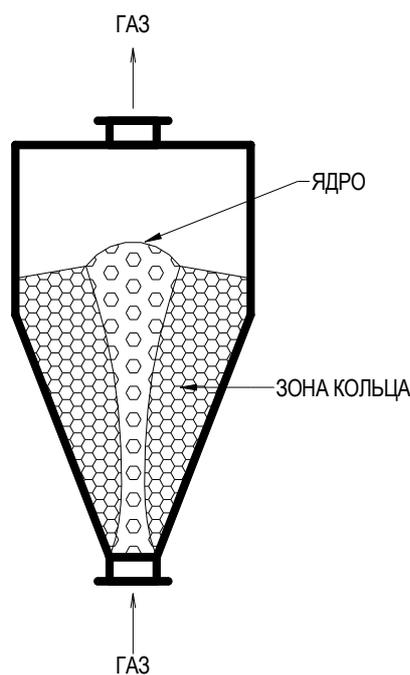


Рис. 1. Схема аппарата фонтанирующего слоя

Для получения математической модели, отражающей эксергетические особенности работы аппарата, применен топологоэксергетический метод. В связи с этим при оценке гидродинамической эффективности ФС применяется терминология топологоэксергетического подхода [6-7]. В соответствии со стратегией данного метода реализация поставленной задачи включила в себя следующие этапы:

- 1) построение кодовой топологоэксергетической диаграммы аппарата;

- 2) построение топологоексергетической структуры связи;
- 3) распределение причинно-следственных отношений в рассматриваемой ФТС;
- 4) вывод системы уравнений;
- 5) раскрытие коэффициентов в полученных уравнениях;
- 6) решение системы уравнений;
- 7) анализ влияния конструктивно-технологических параметров аппарата на эффективность использования энергии.

Основные допущения, примененные при моделировании процессов в АФС:

- воздух в аппарат подводится при постоянной температуре;
- моделирование производится для условия устойчивого фонтанирования;
- рассматривается стационарный режим работы аппарата;
- зоны кольца и ядра представлены в виде сосредоточенных масс M_k, M_j .

Для построения кодовой диаграммы рассмотрим картину энергетических преобразований в АФС.

Фонтанирующий слой условно можно разделить на две зоны: кольца и ядра. Для зоны ядра характерно интенсивное движение частиц в восходящем потоке газа. В зоне кольца движение газового потока не столь интенсивно, поэтому частицы под действием силы тяжести опускаются вниз. Таким образом, зона кольца характеризуется значительно большей массой материала и скоростью частиц на порядок ниже, чем скорость частиц зоны ядра.

Подаваемый в аппарат воздушный поток преодолевает гидравлическое сопротивление входного патрубка. Далее поток поступает в зону ядра и в зону кольца. Здесь энергия потока затрачивается для преодоления сил тяжести и трения при непосредственном контакте с частицами и на сообщение им конечной скорости. Кроме этого энергия потока затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений зон ядра и кольца, после чего воздушный поток преодолевает гидравлическое сопротивление выходного патрубка.

Кодовая топологоексергетическая диаграмма (рис. 2) отражает описанную картину эсергетических взаимодействий в виде, удобном для построения топологоексергетической структуры связи.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

I – источник эсергетической мощности воздушного потока

II – диссипативные структуры:

R1 – диссипатор эсергии, отражающий потери подведенной эсергии на преодоление гидравлического сопротивления входного патрубка;

R2 – диссипатор эсергии, отражающий потери подведенной эсергии на преодоление гидравлического сопротивления зоны ядра;

R3 – диссипатор эсергии, отражающий потери подведенной эсергии на преодоление гидравлического сопротивления зоны кольца;

R4 – диссипатор эсергии, отражающий потери подведенной эсергии на сопротивление при движении массы зоны ядра M_j ;

R5 – диссипатор эсергии, отражающий потери подведенной эсергии на сопротивление при движении массы зоны кольца M_k ;

R6 – диссипатор эсергии, отражающий потери подведенной эсергии на преодоление гидравлического сопротивления выходного патрубка;

III – сток эсергетической мощности воздушного потока.

В соответствии с кодовой диаграммой разработана топологоексергетическая структура связи АФС, представленная на рисунке 3.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения:

P_i – давление воздушного потока, Па;

Q_i – объемный расход воздушного потока, м³/с;

R_i – диссипатор эсергии;

V_i – скорость частицы, м/с;

F_i – обобщенная сила, Н.

В топологоексергетической структуре связи показана циркуляция потоков мощности, затрачиваемой на движение сосредоточенных масс ядра – $F_{15}V_{15}$ и кольца $F_{19}V_{19}$.

Общая формула для аналитического описания любого R_i -элемента данного аппарата следующая:

$$R_i = \frac{e_i}{f_i},$$

где: e_i – обобщенное усилие i -ого элемента системы; f_i – обобщенный поток i -ого элемента системы.

Аналитические выражения R_i -элементов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Аналитические выражения R_i -элементов

Обозначение диссипатора в кодовой диаграмме	Обозначение диссипатора в топологоексергетической структуре	Аналитическое выражение
R_1	R_2	$R_2 = \frac{8\xi_{вх}\rho_c Q_1}{\pi^2 d_{вх}^4}$
R_2	R_8	$R_8 = 0.4 \frac{G_j^2 a_j}{g\rho_m \varepsilon_j^3} \left(\frac{G_j}{a_j \mu} \right)^{-0.1}$
R_3	R_9	$R_9 = 0.4 \frac{G_k^2 a_k}{g\rho_m \varepsilon_k^3} \left(\frac{G_k}{a_k \mu} \right)^{-0.1}$
R_4	R_{13}	$R_{13} = \xi_j$
R_5	R_{17}	$R_{17} = \xi_k$
R_6	R_{21}	$R_{21} = \frac{8\xi_{вых}\rho_c Q_{19}}{\pi^2 d_{вых}^4}$

В таблице 1 приняты следующие обозначения:

$\xi_{вх}, \xi_{вых}$ – коэффициенты гидравлического сопротивления входного и выходного патрубка соответственно;

ρ_c, ρ_m – плотность воздуха и материала, кг/м³;

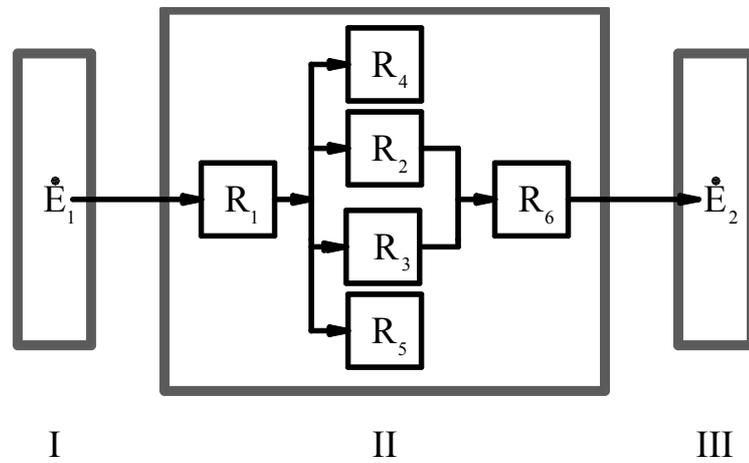


Рис. 2. Кодовая топологоэнергетическая диаграмма гидродинамических взаимодействий в аппарате при стационарном режиме устойчивого фонтанирования

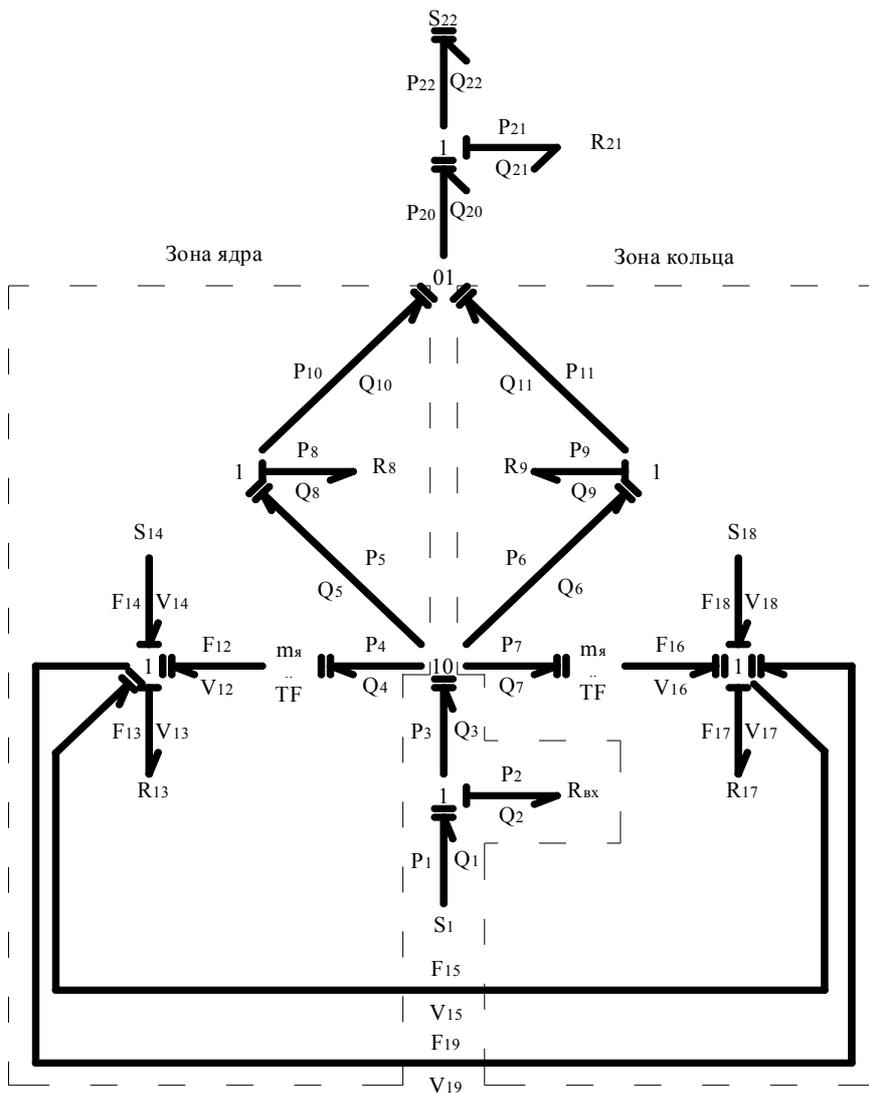


Рис. 3. Топологоэнергетическая структура связи АФС

$d_{вх}, d_{вых}$ - диаметры входного и выходного патрубков соответственно, м;

$G_я, G_к$ - удельный массовый расход материала в зонах ядра и кольца соответственно, кг/(с·м²);

$a_я, a_к$ - удельная поверхность слоя материала в зонах ядра и кольца соответственно, м²/м³;

$\varepsilon_я, \varepsilon_к$ - порозность слоя зон ядра и кольца соответственно;

μ - коэффициент динамической вязкости воздуха, Н·с/м².

Особенностью представления данной диаграммы связи является присутствие в ней двух источников составляющих S_{14} и S_{18} , отражающих силы тяжести сосредоточенных масс зон ядра и кольца, соответственно:

$$S_{14} = M_я g,$$

$$S_{18} = M_к g,$$

где: $M_я$ – масса материала в зоне ядра, $M_к$ – масса материала в зоне кольца.

На основании топологоэксергетической структуры связи получена система уравнений (1), характеризующая в аналитическом виде картину эксергетических преобразований при стационарном режиме работы аппарата.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 Q_1 - P_2 Q_2 - P_3 Q_3 = 0 \\ Q_1 = Q_2 = Q_3 \\ P_3 Q_3 - P_4 Q_4 - P_5 Q_5 - P_6 Q_6 - P_7 Q_7 = 0 \\ P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_7 \\ P_5 Q_5 - P_8 Q_8 - P_{10} Q_{10} = 0 \\ Q_5 = Q_8 = Q_{10} \\ Q_8 = R_8^{-1} P_8 \\ P_6 Q_6 - P_9 Q_9 - P_{11} Q_{11} = 0 \\ Q_6 = Q_9 = Q_{11} \\ Q_9 = R_9^{-1} P_9 \\ F_{12} V_{12} - F_{13} V_{13} - F_{14} V_{14} - F_{15} V_{15} = 0 \\ V_{12} = V_{13} = V_{14} = V_{15} \\ F_{12} = m_я P_4 \\ Q_4 = m_я V_1 \\ F_{16} V_{16} - F_{17} V_{17} - F_{18} V_{18} - F_{19} V_{19} = 0 \\ V_{16} = V_{17} = V_{18} = V_{19} \\ F_{16} = m_к P_7 \\ Q_7 = m_к V_{16} \\ P_{10} Q_{10} + P_{11} Q_{11} - P_{20} Q_{20} = 0 \\ Q_{10} + Q_{11} - Q_{20} = 0 \\ P_{20} Q_{20} - P_{21} Q_{21} - P_{22} Q_{22} = 0 \\ Q_{20} = Q_{21} = Q_{22} \\ Q_{21} = R_{21}^{-1} P_{21} \end{array} \right. \quad (1)$$

Для оценки эффективности использования энергии при работе аппарата определим коэффициент эксергетической эффективности (η_1), обобщенную эксергодиссипативную функцию (ОЭДФ) и обобщенный критерий (ОТД) [3].

Коэффициент эксергетической эффективности АФС определяется по уравнению:

$$\eta_1 = \frac{E_{пол}}{E_{под}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где: $E_{пол}$ - эксергия, затраченная на организацию движения слоя, определяется по уравнению (3). $E_{под}$ - подведенная к системе эксергия, определяется по уравнению (4).

$$E_{пол} = F_3 V_3 + F_8 V_8; \quad (3)$$

$$E_{под} = P_1 Q_1. \quad (4)$$

Обобщенная эксергодиссипативная функция определяется как сумма потерь эксергии на R-элементах. Кроме того в АФС подведенная эксергия будет рассеиваться на преодоление силы тяжести.

$$ОЭДФ = \sum Q_i^2 R_i + \dot{M}_я g H_я + \dot{M}_к g H_к, \quad (5)$$

где: $\dot{M}_я$ - массовый расход материала зоны ядра, $\dot{M}_к$ - массовый расход материала зоны кольца, $H_я$ - высота зоны ядра, $H_к$ - высота зоны кольца.

На основании системы уравнений (1) и уравнения (5) получим ОЭДФ в виде:

$$ОЭДФ = Q_2^2 R_2 + Q_8^2 R_8 + Q_9^2 R_9 + F_{13} V_{13} + F_{17} V_{17} + Q_{21}^2 R_{21} + \dot{M}_я g H_я + \dot{M}_к g H_к, \quad (6)$$

Обобщенный критерий ОТД представляет отношение обобщенной эксергодиссипативной функции к подведенной эксергетической мощности:

$$ОТД = \eta_2 = \frac{ОЭДФ}{E_{под}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Анализ результатов. Проверка адекватности модели проводилась на аппарате, характеристики которого представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные характеристики аппарата фонтанирующего слоя

Параметр	Единицы измерения	Числовое значение
Диаметр аппарата	мм	150
Диаметр входного канала	мм	27
Диаметр выходного канала	мм	100
Угол раскрытия конуса	град	60
Длина выходного патрубка	мм	90

В качестве критерия адекватности модели использовался параметр доступный для измерения – мощность воздушного потока на выходе из аппарата. На основании результатов идентификации модели установлено, что величины, полученные по математической модели и в результате измерений, отличаются не более чем на 8,0%, что является вполне приемлемым.

Полученная модель дает возможность проанализировать влияние конструктивно-технологических параметров АФС на эффективность использования эксергии в нем.

Исследуем влияние следующих конструктивно-технологических параметров аппарата – давления на входе P_1 , диаметра входного патрубка $d_{вх}$, угла раскрытия конуса α на показатели, определяемые по уравнениям (2, 6, 7).

Результаты исследований представлены в таблицах 3-5.

Таблица 3. Результаты расчета влияния давления воздушного потока на входе в АФС на эксергетическую эффективность

№ опыта п/п	Давление воздушного потока на входе P_1 , МПа	η_1 , %	η_2 , %
1	0.10177	44.77	0.69
2	0.10179	44.66	0.71
3	0.10187	44.40	0.75
4	0.10203	44.21	0.75
5	0.10200	44.21	0.73
6	0.10201	44.23	0.69

Таблица 4. Результаты расчета влияния диаметра входного канала на эксергетическую эффективность АФС

№ опыта п/п	Диаметр входного отверстия $d_{вх}$, мм	η_1 , %	η_2 , %
1	20	47.95	2.03
2	25	47.54	1.49
3	30	47.29	1.22
4	35	47.25	1.05
5	40	47.38	0.93
6	44	47.56	0.86

Таблица 5. Результаты расчета влияния угла раскрытия конуса на эксергетическую эффективность АФС

№ опыта п/п	Угол раскрытия конуса α , град	η_1 , %	η_2 , %
1	30	46.68	1.1
2	35	47.00	1.15
3	40	47.29	1.21
4	45	47.54	1.28
5	50	47.77	1.35
6	55	47.98	1.43
7	60	48.18	1.53

Изменение величин η_1 и η_2 в представленных таблицах 3-5 незначительно, что можно объяснить ограниченными возможностями лабораторной установки,

не позволяющими провести исследования в более широком диапазоне изменения массы материала.

Анализ результатов показывает, что уровень энергосбережения будет возрастать при использовании следующих конструктивных и технологических параметров:

1) давления в исследуемом интервале $P_1=0.10177$ МПа;

2) максимально возможного диаметра входного отверстия $d_{вх} = 44$ мм (для обеспечения режима фонтанирования должно выполняться условие $\frac{d_{вх}}{D_a} < 0.3$);

3) угла раскрытия конуса $\alpha = 60^\circ$.

Выводы.

1 На основании топологоэксергетического метода получена математическая модель, описывающая картину эксергетических взаимодействий в АФС в стационарном режиме фонтанирования.

2 Получены зависимости, отражающие влияние конструктивно-технологических параметров на эксергетическую эффективность аппарата. Использование данных зависимостей позволяет на этапе проектирования найти оптимальные значения конструктивно-технологических параметров с позиций энергосбережения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матур К., Эпстайн Н. Фонтанирующий слой – Л.: Химия, 1978. – 288с.
2. Кунин Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление – М.: Химия, 1976. – 448с.
3. Братуга Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико-технологических системах.// Интегровані технології та енергозбереження.-2003, 4. С. 20-27
4. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Тучина У.Н. Разработка топологоэксергетического метода анализа энергосбережения физико-технологических систем // Збірник тез доповідей 4-ї Всеукраїнської науково-методичної конференції “Екологія та інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”, Дніпродзержинськ, 2002. С.235-236
5. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братуга Э.Г., Тучина У.Н. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС) – Часть 1// Интегровані технології та енергозбереження.-2004.-№4. С.81-89.
6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Элементная база топологоэксергетического метода анализа физико-технологических систем. Математическое моделирование, №1 (13), 2005, Днепродзержинск: ДГТУ, 2005. С.1-8.
7. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Система переменных в топологоэксергетическом методе описания физико-технологических систем (ФТС). Математическое моделирование, №2 (10), 2004, Днепродзержинск: ДГТУ, 2004. С.56-60