

УДК 662.76 (045)

В. Н. Диденко, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Е. М. Кашин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА РОТОРНОГО ТИПА

Статья посвящена обзору метода определения толщины активной зоны газогенератора роторного типа, применяемого для газификации твердого топлива. Анализируется роль данного метода в практическом использовании.

Ключевые слова: газогенератор, активная зона, кислородная зона, восстановительная зона.

На фоне роста стоимости углеводородных топлив наблюдается усиление роли альтернативной энергетики в современном мире. В эксплуатацию вводятся новые объекты атомной и солнечной энергии, гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии. К последним можно отнести установки для газификации древесного топлива (газогенераторы).

В данный момент в мире существует достаточное количество разновидностей газогенераторов, первые из которых появились еще четыре века назад [1, 2]. Основные газогенераторы сегодня – это установки прямого, обращенного, поперечного процесса газификации с неподвижным и циркулирующим кипящими слоями, а также различные модификации вышеуказанных [3]. В 2013 г. появился новый тип газогенераторов – роторный (патент РФ № 2497045 «Газогенератор твердого топлива» [4]).

В отличие от современных газогенераторов газогенератор роторного типа достаточно компактен, использует различные виды топлив (в том числе и опил, не используемый в классических газогенераторах) и позволяет работать в больших диапазонах выходной мощности по сравнению с традиционными газогенераторами. Ограничение по мощности у классических газогенераторов возникает при использовании больших диаметров шахт газогенераторов и объясняется сложностью подвода газифицирующего агента (воздуха, кислорода, паровоздушной смеси и т. д.) во внутренние слои топлива.

Действие центробежных сил в газогенераторе роторного типа снимает проблемы классических газогенераторов, в том числе затрудненное движение топлива и плохой доступ газифицирующего агента к слоям топлива. А особенности технологии образования генераторного газа в роторном газогенераторе дают возможность проведения непрерывной загрузки топлива в газогенератор без остановки хода процесса газификации, что невозможно в традиционных газогенераторах.

Загрузка в роторном газогенераторе идет при одновременном потреблении топлива, при этом изменение массы потребленного (газифицированного) топлива примерно равно изменению массы вновь загруженного топлива. Это равенство позволяет при-

близить момент инерции вращающегося ротора газогенератора практически к постоянной величине, что способствует минимизации потребления энергии на вращение ротора.

Важнейшей рабочей характеристикой любого газогенератора, в том числе роторного, является масса загруженного топлива. При заданных габаритах ротора масса загрузки определяется толщиной слоя. Условием образования активных зон газификации топлива (зоны сушки, пиролиза и восстановления) является наличие слоя топлива оптимальной толщины. От толщины слоя зависит напряженность горения и содержание в газе смолы, определяющее качество газа [5]. При **недостаточной толщине** слоя сырья в роторном газогенераторе возможны следующие последствия:

- увеличение температуры газов, выходящих из активного слоя, обусловленное неполным поглощением теплоты на экзотермические реакции восстановления CO_2 и разложения H_2O [6];
- образование прогаров в слое, уменьшение толщин активных зон и их последующая ликвидация;
- значительное снижение производительности газогенератора, а следовательно, и его коэффициента полезного действия.

При **избыточной толщине** возможны следующие негативные последствия:

- увеличение массогабаритных показателей газогенератора;
- повышение аэродинамического сопротивления слоя топлива [7], приводящее к ухудшению его газопроницаемости и даже к полной остановке процесса газификации.

Поскольку толщина слоя загрузки может оказывать сильное влияние на работу газогенератора роторного типа, то задача определения толщины слоя загрузки в таком газогенераторе является весьма актуальной.

Детальное моделирование процесса газификации в слое является чрезвычайно сложной задачей, поэтому неизбежны упрощающие допущения [8–10]. В данной работе использован подход В. В. Померанцева [11], по которому толщина слоя топлива определяется из уравнения выгорания частицы в слое:

$$(1-m_0)d\xi = \frac{x dx}{0,217 \left(2\alpha_{\text{сл}} - 1 + n\delta_{01} \left\{ x + (1-x) \left[\frac{x^2}{2} + 2x + 3 \ln(1-x) \right] \right\} \right)}, \quad (1)$$

где $m_0 = \frac{V_{\Pi}}{V} = \frac{V - V_C}{V} = \frac{\rho_{\text{каж}} - \rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{каж}}}$ – начальная порозность; V_{Π} , V_C – объем пустот и объем, занимаемый углеродом кокса в некотором объеме слоя V ; $\rho_{\text{каж}}$ – кажущаяся плотность, кг/м³; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность, кг/м³; δ_{01} – начальный размер наиболее крупной частицы; δ_1 – текущий размер наиболее крупной частицы; x – относительный текущий размер частицы $x = \frac{\delta_1}{\delta_{01}}$; ξ – отношение толщины слоя

h к размеру наиболее крупной частицы $\xi = \frac{H}{\delta_{01}}$;

$\alpha_{\text{сл}}$ – коэффициент избытка воздуха на выходе из слоя; $n = \frac{1}{\delta_{01} - \delta_{0\text{мин}}}$ – коэффициент линейности распределения частиц исходного топлива по размерам; $\delta_{0\text{мин}}$ – начальный размер частицы самой мелкой фракции.

При полифракционном составе с переменной порозностью и равномерным распределением частиц по фракциям $\delta_{0\text{мин}} = 0$ и $n\delta_{01} = 1$.

При полифракционном составе с переменной порозностью и неравномерным распределением частиц по фракциям $\delta_{0\text{мин}} > 0$ и $n\delta_{01} > 1$.

При монофракционном составе с постоянной порозностью $\delta_{0i} = \delta_{01} = \delta_{0\text{мин}}$ и $n\delta_{01} \rightarrow \infty$.

Величины $(1-m_0)\xi$ называются плотной толщиной слоя, равной его толщине при отсутствии пор.

Для получения зависимости плотной толщины кислородной зоны слоя загрузки $(1-m_0)\xi_{\text{к.з}}$ от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\text{сл}}$ и относительного размера частицы x уравнение (1) интегрируется в следующих пределах: от $\xi = 0$ при $x = 1$ до $\xi = \xi_{\text{к.з}}$ при $x = x_{\text{к.з}}$ в диапазоне $\alpha_{\text{сл}} \leq 1$.

Для получения зависимости плотной толщины слоя загрузки от $\alpha_{\text{сл}}$ и x уравнение (1) интегрируется в следующих пределах:

а) при $\alpha_{\text{сл}} \leq 1$ от $\xi = \xi_{\text{к.з}}$ при $x = x_{\text{к.з}}$ до $\xi = \xi_{\text{полн}}$ при $x = 0$;

б) при $\alpha_{\text{сл}} > 1$ от $\xi = 0$ при $x = 1$ до $\xi = \xi_{\text{полн}}$ при $x = 0$.

Парциальное давление кислорода p_1 в кислородной зоне определяется по уравнению:

$$p_1 = 0,21 \times \left(\alpha_{\text{сл}} - 1 + n\delta_{01} \left\{ x + (1-x) \left[\frac{x^2}{2} + 2x + 3 \ln(1-x) \right] \right\} \right) \frac{P_T}{\alpha_{\text{сл}}}, \quad (2)$$

где P_T – давление воздуха, подаваемого в камеру сгорания.

Относительный текущий размер частицы на границе кислородной и восстановительной зон $x_{\text{к.з}}$ определяется из уравнения (2) при $p_1 = 0$:

$$\alpha_{\text{сл}} - 1 + n\delta_{01} \times \left\{ x_{\text{к.з}} + (1-x_{\text{к.з}}) \left[\frac{x_{\text{к.з}}^2}{2} + 2x_{\text{к.з}} + 3 \ln(1-x_{\text{к.з}}) \right] \right\} = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) для разных значений $\alpha_{\text{сл}}$ осуществлялось численно для следующих случаев:

$n\delta_{01} = 1,0$ – полифракционный состав с переменной порозностью и равномерным распределением частиц по фракциям;

$n\delta_{01} = 10$ – полифракционный состав с переменной порозностью и равномерным распределением частиц по фракциям;

$n\delta_{01} \rightarrow \infty$ (принято 10000) – монофракционный состав с постоянной порозностью.

Зависимость $x_{\text{к.з}}$ от $\alpha_{\text{сл}}$ представлена на рис. 1, 3, 5.

На рис. 2, 4, 6 представлены результаты численного интегрирования уравнения (1) при различных значениях $\alpha_{\text{сл}}$.

При монофракционном составе топлива ($n\delta_{01} \rightarrow \infty$) для определения $x_{\text{к.з}}$ от $\alpha_{\text{сл}}$ использовалась следующая зависимость:

$$\frac{1-m}{1-m_0} = \frac{I}{x_{\text{к.з}}}, \quad (4)$$

где $I = n\delta_{01} \left\{ x + (1-x) \left[\frac{x^2}{2} + 2x + 3 \ln(1-x) \right] \right\}$.

При монофракционном составе в процессе газификации порозность не меняется ($m_0 = m = \text{const}$), отсюда

$$I = x_{\text{к.з}}. \quad (5)$$

Поскольку на границе кислородной и восстановительной зон парциальное давление кислорода равно нулю ($p_1 = 0$), то из уравнений (2) и (5) $\alpha_{\text{сл}} - 1 + I = 0$ и окончательно

$$\alpha_{\text{сл}} = 1 - I = 1 - x_{\text{к.з}}. \quad (6)$$

Интегрирование уравнения (1) для ряда значений $\alpha_{\text{сл}}$ с соответствующими по уравнению (6) значениями $x_{\text{к.з}}$ дает значения $(1-m_0)\xi_{\text{полн}}$ и $(1-m_0)\xi_{\text{к.з}}$ для случая $n\delta_{01} \rightarrow \infty$.

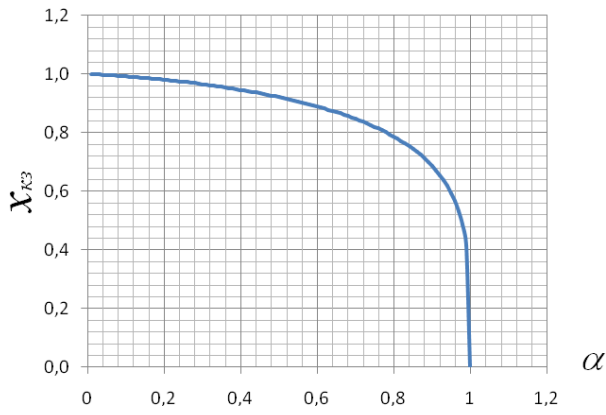


Рис. 1. Зависимость относительного текущего размера частицы на границе кислородной и восстановительной зон $x_{к.з}$ от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{сл}$ на выходе из полифракционного слоя с переменной порозностью и равномерным распределением частиц по фракциям ($n\delta_{01}=1$)

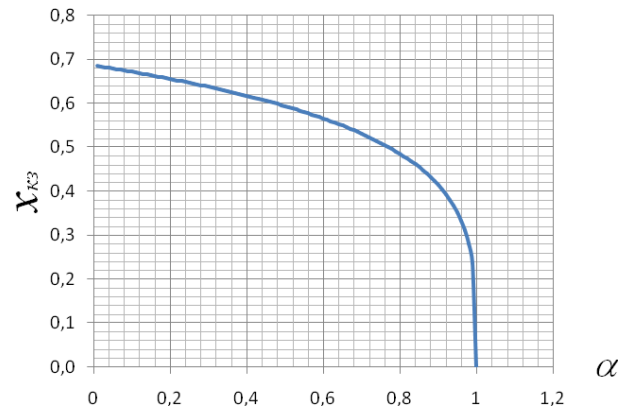


Рис. 3. Зависимость относительного текущего размера частицы на границе кислородной и восстановительной зон $x_{к.з}$ от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{сл}$ на выходе из полифракционного слоя с переменной порозностью и неравномерным распределением частиц по фракциям ($n\delta_{01}=10$)

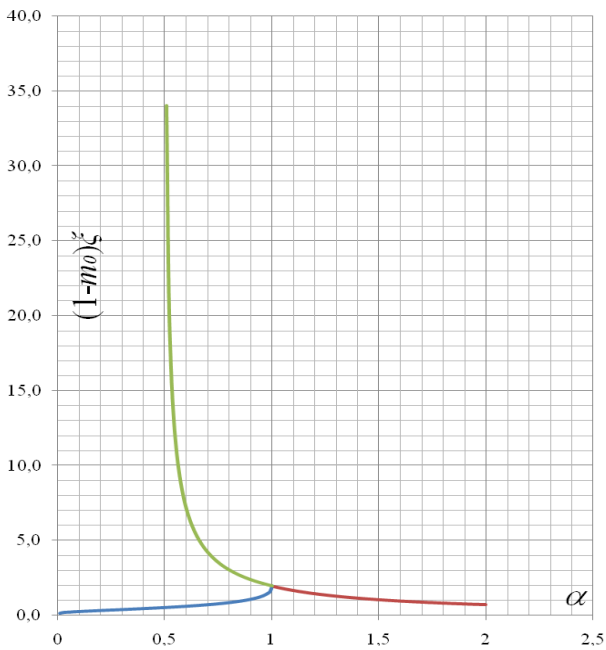


Рис. 2. Зависимость плотной толщины слоя топлива от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{сл}$ на выходе из полифракционного слоя с переменной порозностью и равномерным распределением частиц по фракциям ($n\delta_{01}=1$)

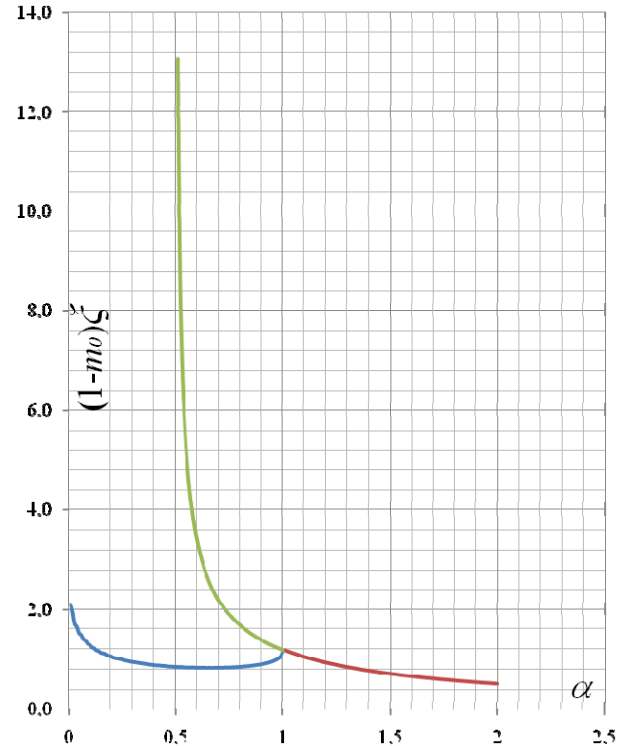


Рис. 4. Зависимость толщины слоя топлива от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{сл}$ на выходе из полифракционного слоя с переменной порозностью и неравномерным распределением частиц по фракциям ($n\delta_{01}=10$)

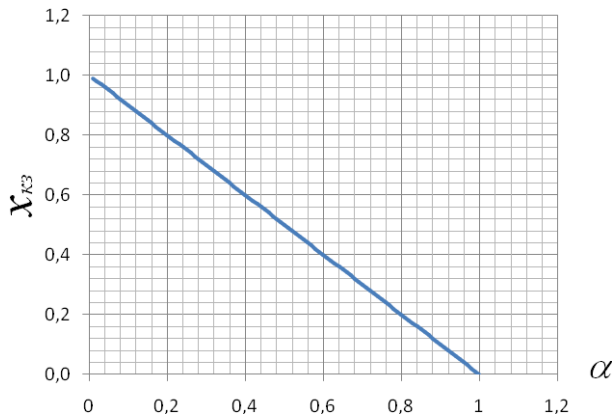


Рис. 5. Зависимость относительного текущего размера частицы на границе кислородной и восстановительной зон $x_{к.з}$ от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{сл}$ на выходе из монофракционного слоя с постоянной порозностью

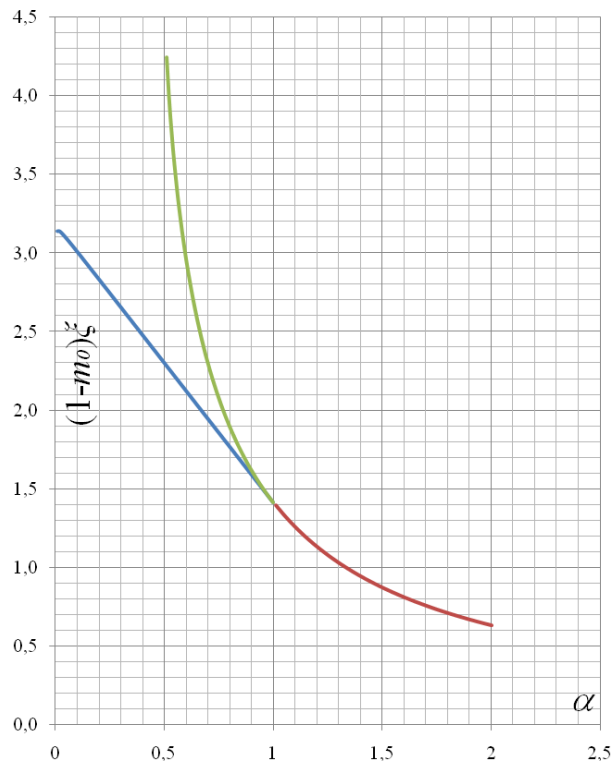


Рис. 6. Зависимость толщины слоя топлива от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{сл}$ на выходе из монофракционного слоя с постоянной порозностью

Методика позволяет рассчитывать толщину слоя загрузки, необходимую для образования активных зон в газогенераторе роторного типа.

В качестве примера рассматривается загрузка сухих отходов деревообработки от опилок до крупных частиц с максимальным размером до 50 мм ($\delta_{01} = 50$ мм). Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha_{сл} = 0,9, \text{ плотность } \rho_{каж} = 0,15 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ и } \rho_{нас} = 0,1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\text{из уравнения (2) } m_0 = \frac{0,15 - 0,1}{0,15} = 0,33.$$

Значения $(1 - m_0)\xi_{полн}$ и $(1 - m_0)\xi_{к.з}$ определяются графически по рис. 2, 4, 6 (таблица).

Характеристика слоя	Плотная толщина		Толщина слоя		
	$(1 - m_0) \times \xi_{полн}$	$(1 - m_0) \times \xi_{к.з}$	$H_{полн}$, мм	$H_{к.з}$, мм	$H_{восст}$, мм
Полифракционный состав с переменной порозностью и равномерным распределением частиц по фракциям $n\delta_{01} = 1$	2,3	1,0	171	74	97
Полифракционный состав с переменной порозностью и неравномерным распределением частиц по фракциям $n\delta_{01} = 10$	1,4	0,95	104	71	33
Монофракционный состав с постоянной порозностью $n\delta_{01} \rightarrow \infty$ ($n\delta_{01} = 10000$)	1,65	1,55	123	116	7

Здесь

$$H_{полн} = \frac{\xi_{полн} (1 - m_0) \cdot \delta_{01}}{1 - m_0}, \quad (7)$$

$$H_{к.з} = \frac{\xi_{к.з} (1 - m_0) \cdot \delta_{01}}{1 - m_0}. \quad (8)$$

Форма и размеры активных слоев газификации у газогенератора роторного типа и классического газогенератора сильно различаются. В рассмотренном выше примере высота слоя газификации полифракционного слоя с переменной порозностью и равномерным распределением частиц по фракциям ($n\delta_{01} = 1$) составляет 171 мм. Как показывает практика, максимально возможная производительность реализуется при использовании прямого и обратного классического газогенератора диаметром шахты 0,7 м. Дальнейшее увеличение диаметра с целью повышения мощности газогенератора делает невозможным подвод окислителя (воздух, кислород) либо смеси с ним водяного пара во внутренние слои топлива. Высота газогенератора определяется размером бункера газогенератора, находящегося над активными зонами газификации и принимается исходя из вида топлива с соответствующей насыпной плотностью, его расхода в конкретном газогенераторе, а также продолжительности работы на одной загрузке сырьем. Высота газогенераторных установок малой мощности, работающих на древесном топливе, как правило, в 2,5–5 раз превышает диаметр шахты [12–14]. В данном случае высота газогенератора диаметром 0,7 м принимается 2 м.

У роторного газогенератора появляется возможность проведения непрерывной загрузки топлива без остановки хода процесса газификации, бункер как элемент конструкции отсутствует.

Для подтверждения преимуществ роторных газогенераторов были произведены сравнительные расчеты.

Объем зоны газификации в классическом прямоточном газогенераторе:

$$W_K = \frac{\pi D_K^2}{4} H_{Kc}, \tag{9}$$

где H_{Kc} – толщина газификационного слоя в классическом прямоточном газогенераторе; D_K – диаметр классического прямоточного газогенератора.

Объем зоны газификации в роторном газогенераторе:

$$W_P = \frac{\pi}{4} (D_P^2 - (D_P - 2H_{Pc})^2) L_p = \pi L_p H_{Pc} (D_P - H_{Pc}), \tag{10}$$

где H_{Pc} – толщина газификационного слоя в роторном газогенераторе; D_P – диаметр ротора газогенератора; L_p – длина ротора газогенератора.

Из уравнений (9), (10) следует, что объем зоны газификации в роторном газогенераторе, в отличие от классического газогенератора, зависит не только от толщины газификационного слоя и диаметра ротора, но и от его длины. А толщина слоя газификации, в свою очередь, зависит от коэффициента избытка воздуха на выходе из слоя $\alpha_{сл}$ и начального размера наиболее крупной частицы δ_{01} .

При одинаковых толщинах газификационного слоя в роторном и классическом газогенераторах, равных 0,171 м, диаметрах газогенераторов, равных 0,7 м, и высотах газогенераторов – 2,0 м (рис. 7, 8) отношение объемов газификационных зон газогенераторов равно:

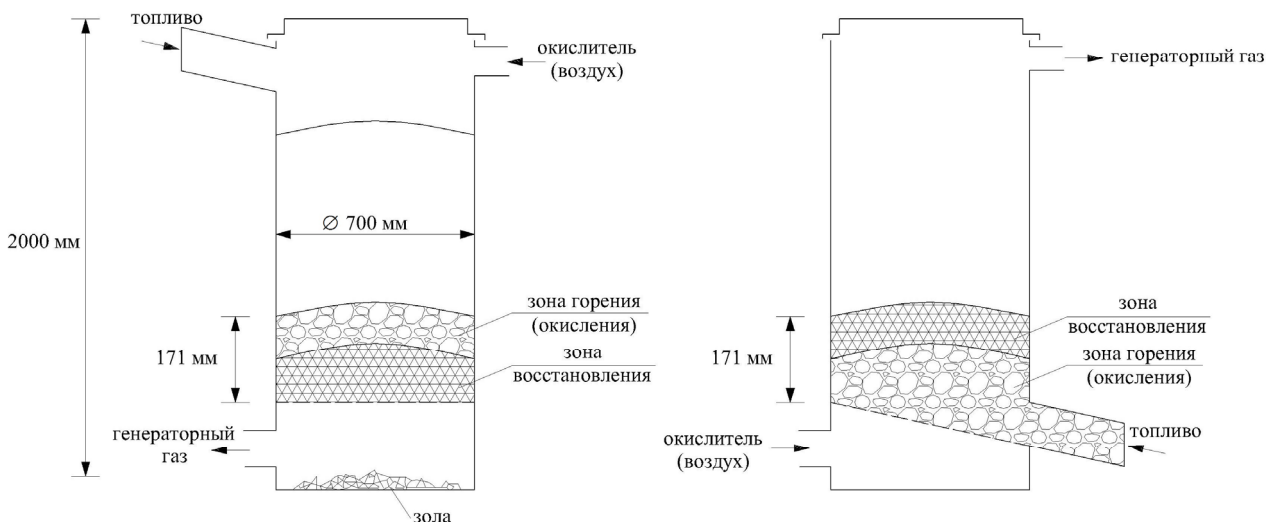


Рис. 7. Газогенераторы прямоточного процесса газификации (направления движения топлива и газов совпадают): а – обращенный с верхней подачей топлива, б – с нижней подачей топлива

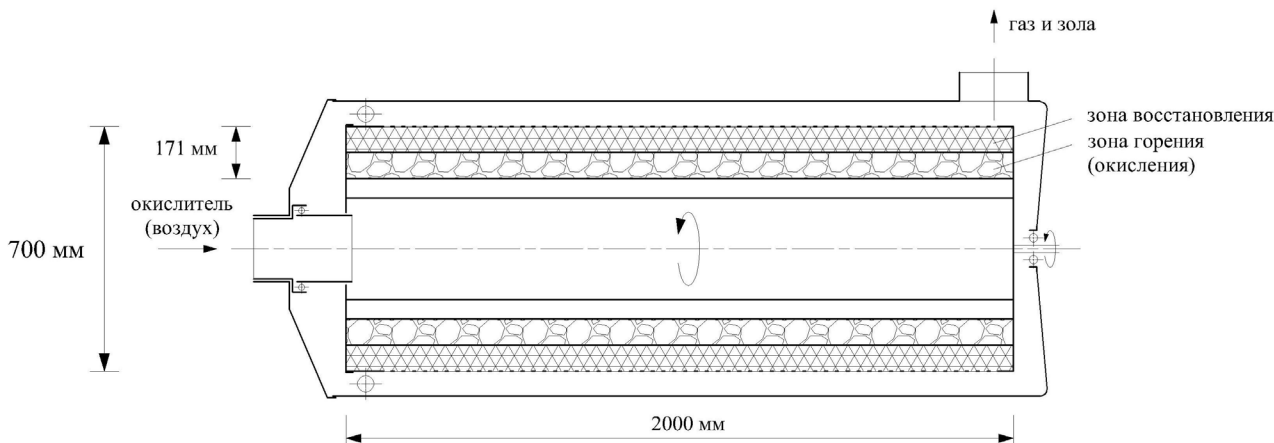


Рис. 8. Газогенератор роторного типа

$$\frac{W_P}{W_K} = \frac{\pi L_p H_{Pc} (D_P - H_{Pc})}{\frac{\pi D_K^2}{4} H_{Kc}} = \frac{4 L_p H_{Pc} (D_P - H_{Pc})}{D_K^2 H_{Kc}} =$$

$$= \frac{4 \cdot 2,0 \cdot 0,171 \cdot (0,7 - 0,171)}{(0,7)^2 \cdot 0,171} = 8,637.$$

Таким образом, объем зоны газификации в роторном газогенераторе в 8,637 раза больше объема зоны газификации в классическом прямоточном газогенераторе.

При одинаковых размерах корпуса и одном виде топлива зоны газификации, образованные цилиндрическими поверхностями, имеют больший объем по сравнению с дискообразными зонами газификации в известных классических конструкциях газогенераторов. Форма зон газификации и их расположение одна в другой, обеспечивают максимальное заполнение камеры газификации активными зонами, позволяя эффективно использовать пространство газогенератора, что влечет за собой либо уменьшение габаритных размеров корпуса при сходных производительностях, либо повышение производительности при сходных габаритных размерах газогенератора.

Библиографические ссылки

1. *Кашин Е. М., Диденко В. Н.* История развития газогенераторов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – 76 с.
2. *Кашин Е. М., Диденко В. Н.* Установки для получения генераторного газа. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – 96 с.

3. *Кашин Е. М., Диденко В. Н.* Активные зоны газогенератора твердого топлива роторного типа // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – 204 с.

4. Пат. 2497045 Российская Федерация, МПК F23G5/027, C10J3/00. ГАЗОГЕНЕРАТОР ТВЕРДОГО ТОПЛИВА / Е. М. Кашин ; заявитель и патентообладатель: Е. М. Кашин. – 2012110419/03 ; заявл. 19.03.2012; опубл. 27.10.2013.

5. *Мезин И. С.* Транспортные газогенераторы. – М. : ОГИЗ СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – 307 с.

6. *Юдушкин Н. Г.* Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1955. – 244 с.

7. Там же.

8. *Канторович Б. В.* Основы теории горения и газификации твердого топлива. – М. : Издательство академии наук СССР, 1958. – 600 с.

9. *Канторович Б. В.* Введение в теорию горения и газификации твердого топлива. – М. : Государственное издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960. – 355 с.

10. *Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б.* Основы практической теории горения. – Л. : ЭНЕРГИЯ, 1973. – 264 с.

11. Там же.

12. *Токарев Г. Г.* Газогенераторные автомобили. – М. : МАШГИЗ, 1955. – 204 с.

13. *Коллеров Л. К.* Газомоторные установки. – М. ; СПб. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. – 240 с.

14. *Юдушкин Н. Г.* Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1955. – 244 с.

V. N. Didenko, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

E. M. Kashin, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Determination of active zone of rotor-type gas generator

The article is devoted to review of the method of determining the value of the active zone of rotor-type gas generator applied in solid fuel gasification. The role of this method is analyzed from practical point of view.

Keywords: gas generator, active zone, oxygen zone, reburning zone.

Получено: 18.11.14