

Теория и практика гидро-, пневмо- и термохимических исследований промышленной горелки с комбинированной интенсификацией сжигания С-Н-О-содержащих топлив

Н.Н. Азимова, В.В. Бараниченко, В.И. Грищенко, Д.С. Цымбалов, О.В. Яценко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Аннотация: Выполнено комбинированное теоретико-практическое исследование параметров горелочного устройства. Определена расходная характеристика системы подачи топлива. Проведены аэродинамические исследования характеристик горелочного устройства, построены поля аксиальной скорости, выявлены критические параметры конструкции узла подачи воздуха. Экспериментально определены температуры внутрикамерных процессов. Разработана математическая модель химических реакций факела, построена зависимость токсичности дизельного топлива от коэффициента избытка воздуха. Определено влияние водяного пара на работу горелочного устройства.

Ключевые слова: горелочное устройство, поле аксиальной скорости, внутрикамерные процессы, термохимические параметры, математическое моделирование, токсичность.

Горелочные устройства (ГУ), как один из главных элементов промышленных, отопительных и иных высокотемпературных систем, на протяжении своего существования постоянно претерпевают изменения, как конструкционные, так и принципиально новые решения позволяют совершенствовать и адаптировать горелочный узел под постоянно растущие требования современности. Учитывая ограничивающие факторы, давление и условия частичной изоляции государства от мирового научного сообщества, разработка и совершенствование отечественных горелочных устройств является приоритетом для технологического лидерства России.

Отличительной характеристикой исследуемого ГУ с комбинированной интенсификацией рабочего режима является: 1) снижение требований к характеристикам допускаемых топлив с возможностью подачи как разнородных, так и некалиброванных жидкостей путем дальнейшего программного регулирования процесса горения, без ухудшения полноты сгорания топлива; 2) особо ответственные параметры относительно

конструкции форсунки и характеристик системы подачи топлива упразднены, вследствие – конструкция и техническая номенклатура этих систем стала более доступна для отечественного рынка; 3) количество токсичных веществ, образующихся в процессе горения, снижено даже при увеличенной номенклатуре допустимого топлива.

Исследовать и оптимизировать конструкцию ГУ только при помощи математического аппарата не представляется возможным, ввиду многофакторности и невозможности корректного математического описания процесса горения, поэтому данного рода исследование необходимо проводить совместно: изучить характеристики опытного образца, в частности, гидро-, пневмо- и термохимические, выполняя на этой базе построение сопряженных адекватных математических моделей (ММ) [1-3]. Такое имитационное экспериментально-компьютерное моделирование значительно ускорит как разработку эталонного образца, так и внедрение ряда технических особенностей в его конструкцию.

Исследование узла подачи топлива. Исследуемый диапазон мощностей для ГУ устанавливается в пределах от 0,2 до 1 МВт., следовательно, для её работы необходимо подавать дизельное топливо (ДТ) в размере от 20 до 100 кг/ч. Численное значение подачи топлива регулируется насосом и зависит от частоты электропитания (управляется частотным регулятором). Тарировочная зависимость насоса представлена на рис.1 и получена путём проливки системы и применения математического аппарата. Формульное представление имеет следующий вид:

$$Q_V = 8.9910^{-4} f - 0.46, \text{ л/мин.}, \quad (1)$$

$$Q_M = 4.5810^{-2} f - 23.5, \text{ кг/час.} \quad (2)$$

где Q – расход топлива (кг/ч); f – частота сети (Гц).

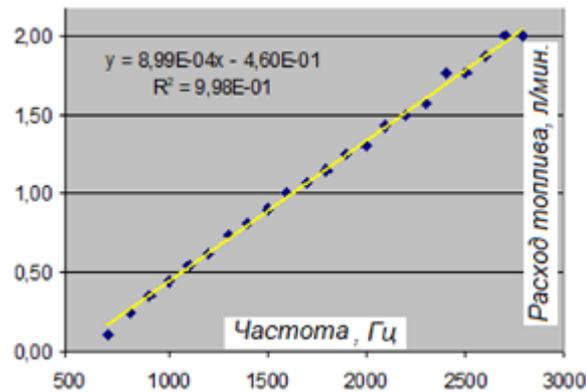


Рис. 1. – Расходная характеристика

О достоверности полученной зависимости свидетельствует коэффициент корреляции формул (1)-(2), равный 0,99 и среднеквадратичное отклонение, не превышающее значение в 0,5 %.

Исследование аэродинамических характеристик элементов ГУ. Необходимый для горения кислород нагнетается дутьевым вентилятором (ДВ), эффективность работы которого обусловлена конструктивными особенностями, в частности, потери в воздушной магистрали и формы его сечения [4]. Сокращение аэродинамических потерь приведет к уменьшению необходимой мощности ДВ (его габаритов и энергопотребления) и снижению общего уровня шума. Анализ выполнялся последовательно в различных сечениях магистрали. Точки, в которых производились измерения и полученные путем математического моделирования поля аксиальной скорости, представлены на рис. 2. Явные формулы моделей течения имеют следующий вид (представлены в порядке спуска по течению):

$$V(x, y) = 2.43\eta e^{1.99 \cdot 10^{-5}(x-9.68)^2 - 5.94 \cdot 10^{-4}(y-57.4)^2} \cdot [x(100-x) \cdot y(100-y)]^{1/8}, \quad (3)$$

$$V(r, \varphi) = 2.43 \cdot \eta \cdot (15.73 + 1.903 \cdot \cos(\varphi + 0.596)) \cdot [1 - (r/42)^8], \quad (4)$$

$$V(r, \varphi) = \eta \cdot (1.589 - 0.293 \cdot \cos(\varphi - 0.563)) \cdot [1 - (r/140)^8], \text{ м/с}, \quad (5)$$

где η – коэффициент мощности привода.

На базе моделей течения определяем уравнения потока рабочего тела в каждом из анализируемых сечений:

$$\langle V \rangle = \int_0^{140} \int_0^{100} V(x, y) dx dy / \int_0^{140} \int_0^{100} dx dy = 8.98 \cdot \eta, \text{ м/с}, \quad (6)$$

$$\langle V \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^{42} V(r, \varphi) r dr d\varphi / \int_0^{2\pi} \int_0^{42} r dr d\varphi = 10.9 \cdot \eta, \text{ М/С}, \quad (7)$$

$$\langle V \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^{140} V(r, \varphi) r dr d\varphi / \int_0^{2\pi} \int_0^{140} r dr d\varphi = 1.271 \cdot \eta, \text{ м/с} \quad (8)$$

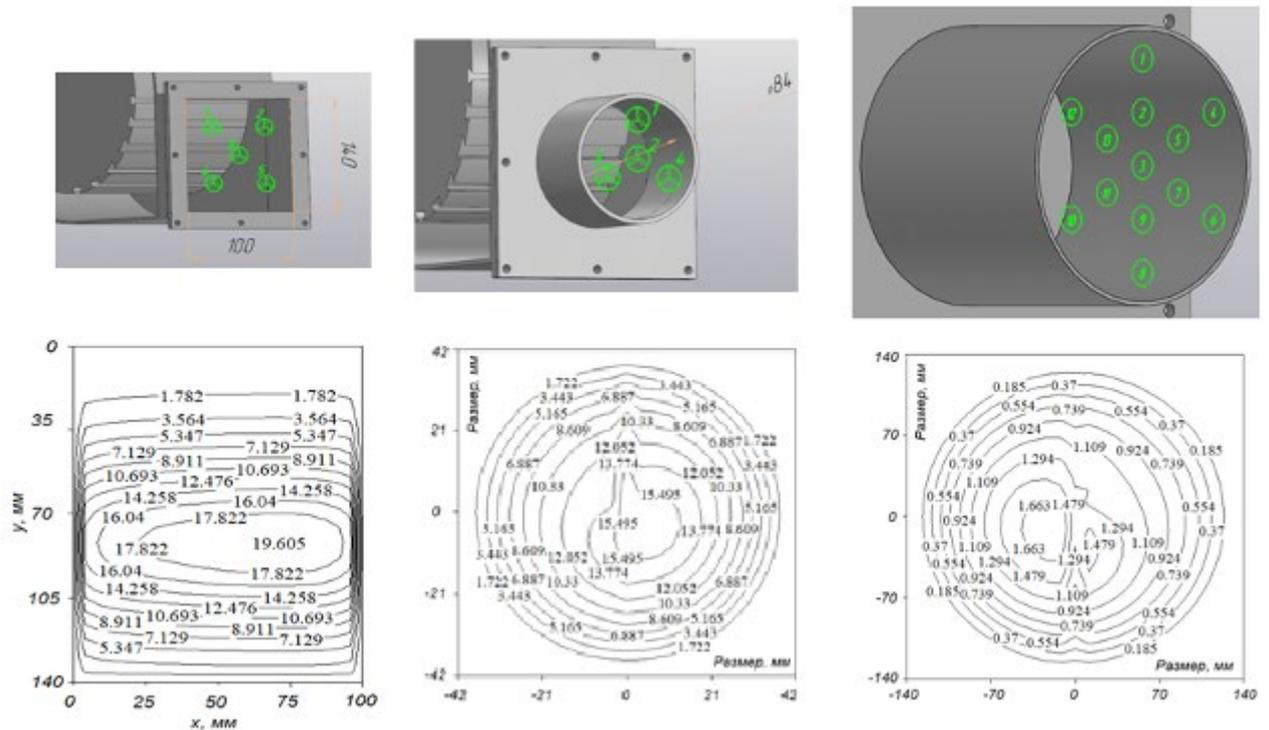


Рис. 2. – Измерительные точки (сверху) и поле аксиальной скорости воздуха (снизу), полученное на основе математических моделей и данных экспериментальных измерений в различных сечениях воздушной магистрали (приведены в порядке спуска по течению слева – направо)

Таким образом, аэродинамическое исследование ГУ показало, что средняя по точкам измерения величина аксиальной скорости более чем на 1/4 отличается от реальной средней по потоку, переходной фланец с формы прямоугольник на круг создает потери до 50 %, а снижение эффективности в соединительной гофре не превышает значение в 3 %. При этом, во время огневых испытаний установлено, что качественного течения внутрикамерных

процессов (горения) удалось добиться только на малой мощности установленного диапазона (до 25 %), что соответствует расходу воздушной магистрали в 9 %.

Термохимическое исследование опытного образца. Регистрация температур выполнялась одновременно в пяти точках при помощи термопар, с регулированием высоты погружения (рис. 3).

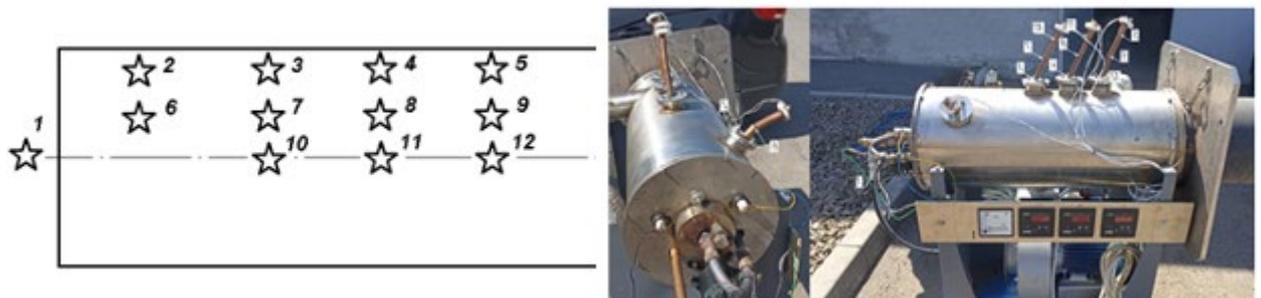


Рис. 3. – Расположение, схематизация и нумерация контрольных точек при термическом анализе течения горючей среды в экспериментальном образце

ГУ: схема – слева, общий вид – справа

Испытания проводились на частичной тепловой мощности (с подачей топлива от 11 до 18 кг/час), при дискретной (200, 320 и 450 мл/мин.) подачи пара (табл.1). Считаем, что время, необходимое для выхода установки на рабочий режим, одинаковое для всех опытов, тогда формульное представление температуры в контрольных точках выглядит следующим образом:

$$T_k(t) = T_0 + (T_k(\infty) - T_0)(1 - e^{-t/\tau}), \quad (9)$$

где k – номер точки.

При сопоставлении расчетных и экспериментальных значений выявлено, что время прогрева ГУ составляет $\tau \approx 180$ с.

Таблица №1

Результаты измерения теплового поля в контрольных точках опытного образца ГУ при различном соотношении топливо – пар (фрагмент данных)

Контроль- ная точка	Подача топлива, кг/час	$T(\infty), ^\circ\text{C}$		
		Подача пара, мл/мин		
		200	320	450
1	18	286	270	197
2	18	794	467	540
10	18	906	820	555
...

Для корректного описания химических процессов ГУ необходимо построить адекватную ММ, для этого выделим следующие вещества, вступающие в реакции факела горения: 1) кислород-содержащие O_2 и O ; 2) водород-содержащие H и H_2 ; 3) оксиды водорода OH , HO_2 , H_2O , H_2O_2 ; 4) углеводороды C , CH , CH_2 , C_2H_4 ; 5) оксиды углерода CO , CO_2 ; 6) азот и его оксиды N_2 , N , NO , N_2O . К перечисленным веществам добавим крайне токсичные циан C_2N_2 , синильную кислоту HCN и диоксид азота NO_2 , а также ацетилен C_2H_2 , служащий источником сажи [5-6]. За основу принимаем уравнения материального баланса по трем элементам (их следствием является сохранение 4-го элемента) и закон Дальтона:

$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{P_{\text{H}}}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_{\text{H}}}{P}\right)_m^{\text{init}}, \quad \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_{\text{N}}}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_{\text{N}}}{P}\right)_m^{\text{init}},$$
$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{P_{\text{O}}}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_{\text{O}}}{P}\right)_m^{\text{init}}, \quad \sum_{m=1}^M P_m = P, \quad (10)$$

в которых $\left(\frac{P_n}{P}\right)_m$ – доля атомов n -го сорта в m -м веществе; P_m – парциальное давление m -го вещества; P – общее давление; индекс init соответствует начальным условиям.

Парциальное давление небазисных веществ определялось на базе констант равновесия отдельных реакций:

$$K_p = \exp(-\Delta G/RT), \quad (11)$$

где $\Delta G = G_p - G_R$ – изменение термодинамического потенциала в реакции; индексы P и R относятся к продуктам и реагентам соответственно; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная.

Термохимический потенциал G_m каждого вещества состоит из энтальпийной H_m и энтропийной S_m частей, объединяемых уравнением:

$$G_m = H_m - T \cdot S_m . \quad (12)$$

Принципиальным фактором в расчетах химического равновесия является температурная зависимость $G_m (T)$ [7]. Она обусловлена известной зависимостью теплоемкости каждого газообразного вещества от температуры $C_{p m} (T)$ и вытекающими из нее соотношениями:

$$H_m(T) = H_m(298.15) + \int_{298.15}^T C_{p m}(T) dT, \quad (13)$$

и
$$S_m(T) = S_m(298) + \int_{298.15}^T C_{p m}(T) / T dT . \quad (14)$$

Зачастую температурную зависимость $C_{p m} (T)$ приближают многочленами, что довольно громоздко в плане вычислительной работы и не очень убедительно с физической точки зрения. Поэтому, учитывая что фактическая теплоемкость веществ в газовой фазе напрямую связана с количеством активных степеней свободы, предлагаем аппроксимацию $C_{p m} (T)$ в следующем виде:

$$C_p(A, B, C, C_0, T) = C_0 + A \cdot [1 - e^{-\left(\frac{T}{B}\right)^C}] , \quad (15)$$

$$H(A, B, C, C_0, T) = H_0 + \int_{298.15}^T C C_p(A, B, C, C_0, T) dT , \quad (16)$$

$$S(A, B, C, C_0, T) = S_0 + \int_{298.15}^T \frac{C_p(A, B, C, C_0, T)}{T} dT . \quad (17)$$

В которых C_0 , H_0 и S_0 – соответственно теплоемкость, энтальпия и энтропия компонента при стандартной температуре 298,15 К; A , B , C – подгоночные коэффициенты.

Физический смысл коэффициента: A – приращение теплоемкости при изменении температуры от нуля до бесконечности; B – температура возбуждения колебательных степеней свободы; C – ширина температурного диапазона.

Таким образом, определение параметров моделей (15)-(17) ограничивается решением следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} \sum_i [C_p(A, B, C, C_0, T) - \{C_0 + A \cdot [1 - e^{-\frac{T}{B}}]^C\}]^2 \rightarrow \min \\ \sum_i [S(A, B, C, C_0, T) - \{S_0 + \int_{298.15}^T \frac{C_p(A, B, C, C_0, T)}{T} dT\}]^2 \rightarrow \min \end{cases}, \quad (18)$$

где i – число табулированных значений термодинамических функций в таблицах, использованных для получения приближенных выражений (15)-(17).

Здесь приводится фрагмент решения оптимизационной задачи (18), приведенный в таблице 2.

Таблица №2

Расчетные значения эмпирических коэффициентов модели (15)-(17).

Вещество	Коэффициент		
	A	B	C
CO	0,942	1217	2,21
O ₂	1,313	1342	1,47
H ₂	1,022	2037	2,643
N ₂	0,938	1320	2,123
...

Результаты сценарного моделирования для различных условий работы ГУ обобщались по формуле общей токсичности [8-10], которая учитывает вредность окислов азота и углеводородов по отношению к угарному газу:

$$R_T = [CO] + 500 \cdot [NO_x] + 50 \cdot [C_n H_m] . \quad (19)$$

Результаты такого расчета для $\beta = 0$ приведены на рис. 4.

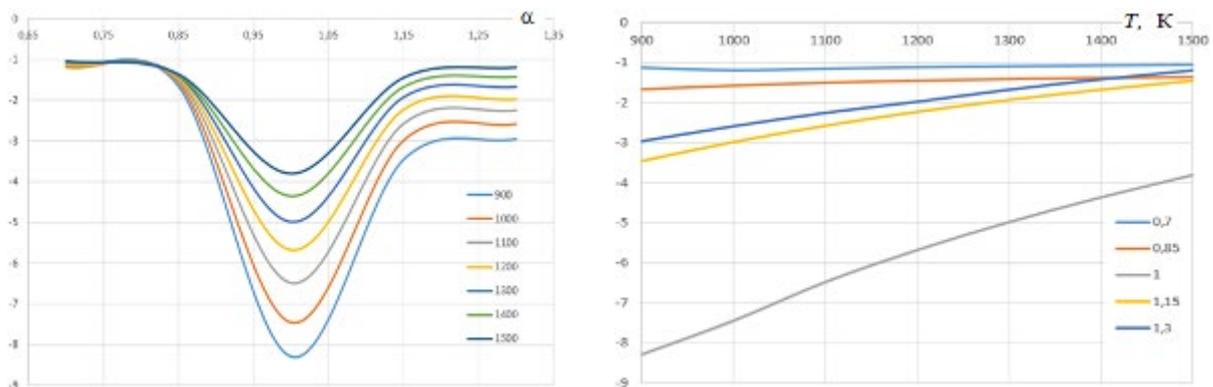


Рис. 4. – Зависимость токсичности ДТ от коэффициента избытка воздуха α (слева) и температуры T (справа) при $\beta = 0$: на оси ординат приведен $\lg R_T$ согласно (19)

Термохимические исследования ГУ показали, что пар эффективен при малой подаче и увеличивает температуру смеси на входе в форсунку и на этапе выхода на рабочий режим, при этом во время увеличения мощности (повышается необходимое количество паро-топливной смеси) способствует обратному, т. е. снижает температуру факела. Обогащение смеси паром интенсифицирует турбулизацию и одновременно сближает скорость окисления углерода и водорода в составе ДТ. Как следствие – горение становится в целом более быстрым, а дымовые газы оказываются менее токсичными.

Вывод. Гидро-, пневмо- и термохимические исследования показали высокий потенциал разрабатываемого горелочного устройства, его конкурентоспособность по надежности и простоте конструкции, а также токсичности, оценивается наряду с лидирующими зарубежными аналогами.

Литература

1. Романова М. Н., Лебедев А. Е., Ватагин А. А., Лебедев Д. В. Определение гидродинамических характеристик однородных и двух несмешивающихся жидкостей // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5778
2. Tanner, Franz. X. “Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays.” SAE Transactions, vol. 106, 1997, pp. 127–40. JSTOR, jstor.org/stable/44730666.

3. Жигулин И.Н., Ладоса Е.Н., Яценко О.В. Тепломассообмен в энергетических и транспортных системах: компьютерные методы исследования и обучения // Изд-во РГУПС. – 2002. – 436 с.
 4. Snyder, H. E., and R. D. Reitz. “Gas Efficient Liquid Atomization Using Micro-Machined Spray Nozzles.” SAE Transactions, vol. 105, 1996, pp. 1260–70. JSTOR, [jstor.org/stable/44736353](https://www.jstor.org/stable/44736353).
 5. Ладоса, Е. Н., Цымбалов, Д.С., Яценко, О. В. Информационное моделирование распыливания и испарения моторного топлива в дизельном двигателе // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – Т. 12, № 1-1(62). – С. 5-14.
 6. Ларионов В. М., Сайфуллин Э. Р., Назарычев С. А., Малахов А. О., Юнусова Э. А., Константинов Н. В. Экспериментальная оценка скорости горения метано-водородного топлива с воздухом при изменении концентрации водорода // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5317
 7. Белов Г.В., Трусков Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013.
 8. Ануфриев И.С. Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара / Диссертация доктора техн. наук // Новосибирск, 2019. – 254 с.
 9. Belov G. On linear programming approach for the calculation of chemical equilibrium in complex thermodynamic systems // J. Math. Chem. 2010. Vol. 47, № 1. pp. 446: doi.org/10.1007/s10910-009-9580-y
 10. Сон К.Э. редуцирование полной системы уравнений химической кинетики для течений многокомпонентных высокотемпературных газов на
-

основе метода частичного локального равновесия // Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 81-90.

References

1. Romanova M. N., Lebedev A. E., Vatagin A. A., Lebedev D. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5778
 2. Tanner, Franz. X. SAE Transactions, vol. 106, 1997, pp. 127-40. JSTOR, jstor.org/stable/44730666.
 3. Zhigulin I.N., Ladosha E.N., Yatsenko O.V. RGUPS. 2002. pp. 436.
 4. Snyder, H. E., and R. D. Reitz. SAE Transactions, vol. 105, 1996, pp. 1260-70. JSTOR, jstor.org/stable/44736353.
 5. Ladosha, E. N., Czy`mbalov, D. S., Yaczenko, O. V. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. V. 12, № 1-1(62). pp. 5-14.
 6. Larionov V. M., Sajfullin E` . R., Nazary` chev S. A., Malakhov A. O., Yunusova E. A., Konstantinov N. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5317
 7. Belov G.V., Trusov B.G. Termodinamicheskoe modelirovanie himicheski reagiruyushchih sistem [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems]. MGTU im. N.E. Baumana. 2013.
 8. Anufriev I.S. Eksperimental'noe issledovanie processov pri szhiganii zhidkih uglevodorodov v gorelochnyh ustrojstvah s podachej peregretoogo vodyanogo para [Experimental study of processes during combustion of liquid hydrocarbons in burner devices with superheated steam supply]. Dissertaciya doktora tekhn. nauk. Novosibirsk, 2019. pp. 254.
 9. Belov G. J. Math. Chem. 2010. Vol. 47, № 1. pp. 446: doi.org/10.1007/s10910-009-9580-y
-



10. Son K.E. Teplofizika vysokih temperatur. 2020. T. 58, № 1. P. 81-90.

Дата поступления: 14.12.2024

Дата публикации: 25.02.2025