

343-2021

# **ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления 13.03.01  
«Теплоэнергетика и теплотехника»  
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)  
всех форм обучения

Воронеж 2021

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра теоретической и промышленной теплоэнергетики

# **ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления 13.03.01  
«Теплоэнергетика и теплотехника»  
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)  
всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК  
ББК

Составители А. В. Бараков, А. А. Надеев

**Топливо и теория горения:** методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А. В. Бараков, А. А. Надеев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 25 с.

В методических указаниях приведена последовательность выполнения лабораторных работ по дисциплинам «Топливо и теория горения» и «Сжигание и термическая переработка топлива»: цель работы, соответствующие теоретические данные, описание применяемого оборудования, порядок проведения экспериментов, порядок обработки полученных результатов экспериментальных исследований. Также приведены контрольные вопросы к каждой работе.

Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения. Будут полезны для студентов, обучающихся по другим направлениям или профилям подготовки.

Ил. 4. Табл. 8. Библиогр.: 4 назв.

УДК  
ББК

**Рецензент** – зав. кафедрой ТПТЭ, канд. техн. наук, доцент В.В. Портнов

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы по дисциплине «Топливо и теория горения», а также «Сжигание и термическая переработка топлива», предназначены для закрепления теоретического материала и приобретения необходимых навыков в постановке и проведении экспериментальных исследований и обработке их результатов различными методами.

Для выполнения каждой работы студент заранее знакомится с методическими указаниями, изучает соответствующий раздел изучаемой дисциплины и готовит необходимые таблицы наблюдений или измерений. По каждой работе студент оформляет письменный отчёт, который должен включать цель работы, краткие теоретические сведения, схему лабораторной установки, протокол опытов, результаты обработки опытных данных и выводы.

По окончании опытов каждый студент должен показать полученные результаты преподавателю и после их одобрения отключить лабораторную установку или персональный компьютер и привести в порядок рабочее место.

Все расчёты выполняются в Международной системе единиц СИ. По каждой работе студент сдаёт зачёт преподавателю. Студенты, не сдавшие зачёт по двум работам, к выполнению следующих работ не допускаются.

Лабораторные работы предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика». Умения и навыки, полученные при выполнении данных работ, необходимы при освоении дисциплины «Котельные установки и парогенераторы».

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

К выполнению работ в лаборатории энергетических систем кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности у преподавателя, ведущего занятия, о чём должна быть сделана запись в журнале инструктажа по технике безопасности. Перед выполнением работ студенты обязаны ознакомиться с данным методическим руководством.

Перед включением лабораторных стендов необходимо проверить исходное положение органов управления и исправность контрольно-измерительного оборудования.

Включение и выключение лабораторных стендов и установок, а также изменение режима работы производятся студентом под наблюдением преподавателя или лаборанта.

В случае возгорания проводки или в других случаях, угрожающих целостности оборудования лаборатории, необходимо немедленно обесточить стенд и сообщить об этом преподавателю или лаборанту. Работать на неисправной установке запрещено.

В случае поражения электрическим током принять меры по освобождению пострадавшего от тока, оказать первую медицинскую помощь, вызвать врача, сообщить о случившемся администрации высшего учебного заведения.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ТОПЛИВА

**Цель работы:** изучение методики определения содержания влаги в аналитической пробе твёрдого топлива, анализ влияния влажности на процесс горения топлива.

### Краткие теоретические сведения

Влага в твёрдом и жидком топливе может содержаться в количестве от 3-5 % до 60-70 %. Она является внешним балластом топлива, уменьшает его горючую часть, требует затраты теплоты на испарение. Испарившаяся влага отбирает у дымовых газов часть теплоты на свой подогрев, от чего снижается температура газов, а вместе с ней и количество теплоты, передаваемой поверхностям нагрева. Для количественной оценки содержания влаги в топливе применяется показатель «влажность» ( $W$ , %).

При изменении влажности топлива от  $W_1^p$  до  $W_2^p$  теплота сгорания  $Q_n^p$  рабочей массы топлива также изменится и составит:

$$Q_{n2}^p = (Q_{n1}^p + 25 \cdot W_1^p) \cdot \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p} - 25 \cdot W_2^p, \text{ кДж/кг.} \quad (1.1)$$

Изменение  $Q_n^p$  приведёт к изменению адиабатической температуры горения. Большое содержание влаги приводит к таким нежелательным явлениям, как смерзание твёрдого топлива при его транспортировке и хранении в зимнее время, ухудшению его размола, уменьшению сыпучести.

Различают два вида влаги в твёрдом топливе: внешнюю и внутреннюю, называемую также аналитической. Внешняя влага состоит из влаги поверхностной (осаждающейся на поверхности топлива) и капиллярной, содержащейся в порах (капиллярах) топлива.

Внутренняя (аналитическая) влага находится частью в коллоидально-связанном состоянии и равномерно распределена по всей массе топлива, а частью в виде гидратной влаги, входящей в состав молекул минеральных примесей.

Для определения аналитической влажности  $W^a$  производится высушивание предварительно подготовленного, доведённого до воздушно-сухого состояния, топлива. Топливо высушивается при температуре 103-105 °С (каменный уголь – в течение часа, бурый уголь – в течение 2 часов) [1], после чего вычисляется убыль массы в процессе сушки и влажность:

$$W^a = \frac{\Delta m}{m} \cdot 100, \%, \quad (1.2)$$

где  $\Delta m$  – убыль массы топлива, г;

$m$  – масса навески влажного топлива (начальная масса топлива), г.

Содержание влаги в топливе не является достаточным показателем энергетической ценности топлива. Для сравнительной оценки топлив по содержанию влаги введено понятие приведённой влажности топлива:

$$W^{np} = \frac{W^p}{Q_n^p}, \text{ (кг} \cdot \text{ \%)/МДж.} \quad (1.3)$$

Если необходимо вычислить рабочую влажность топлива, то её определяют по формуле

$$W^p = W^{en} + W^a \cdot \frac{100 - W^{en}}{100}, \%, \quad (1.4)$$

где  $W^{en}$  – внешняя влажность топлива, %.

Внешняя влажность определяется следующим способом. Поступившую в лабораторию в герметически закрытом сосуде исходную пробу топлива (около 1 кг) высыпают в заранее взвешенный тигель и определяют массу топлива вместе с ним с точностью до одного грамма. Тигель с топливом помещают в сушильный шкаф и доводят до воздушно-сухого состояния путём чередования искусственной подсушки при температуре 65-75 °С и естественной выдержки при комнатной температуре. Подсушка и выдержка длятся примерно по 8 часов. Топливо считается воздушно-сухим, если при последней выдержке масса его в начале выдержки отличается от массы в конце выдержки не более чем на 0,3 %. Внешняя влажность определяется по убыли влаги в процессе сушки с момента первого взвешивания (при поступлении топлива в лабораторию).

Оценка точности вычисления аналитической влажности производится по формуле

$$\delta_{W^a} = \pm \frac{\Delta_g}{m} \cdot 100, \%, \quad (1.5)$$

где  $\Delta_g$  – пределы абсолютной допускаемой погрешности аналитических весов, г.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для определения влажности твёрдого топлива приведена на рис. 1.1. Она состоит из электрического сушильного шкафа 1 типа ШС-80-01 СПУ с автоматическим терморегулятором, бюкса (тигля) 2 с навеской топлива и крышкой 3, эксикатора 4 с химическим реактивом, поглощающим влагу, и аналитических электронных весов 5.

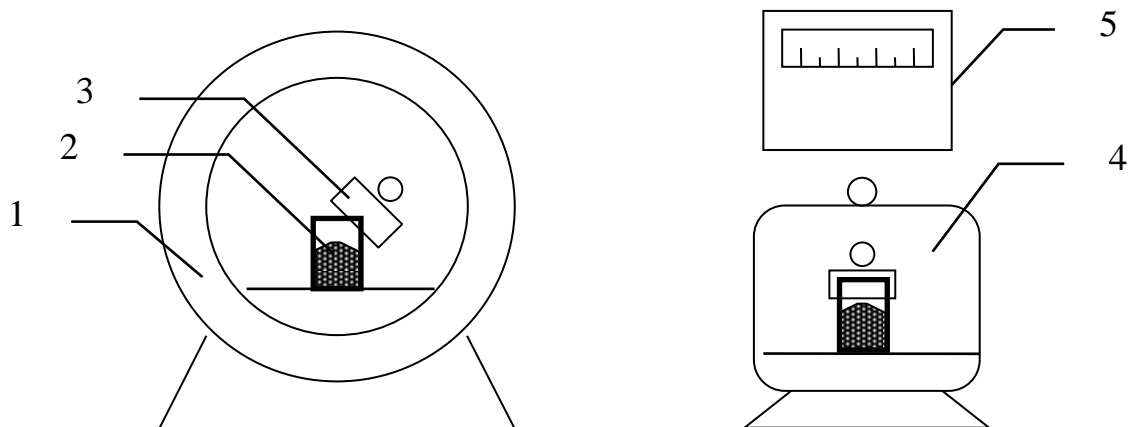


Рис. 1.1. Принципиальная схема лабораторной установки:  
1 – сушильный шкаф; 2 – бюкс; 3 – крышка бюкса; 4 – эксикатор;  
5 – электронные весы

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, правилами включения сушильного шкафа ШС-80-01 СПУ, работой с аналитическими электронными весами.

2. Записать технические характеристики основного оборудования и метрологические характеристики средств измерений, используемых в работе.

3. Взвесить на аналитических весах пустой бюкс с притёртой крышкой.

4. Взвесить бюкс с крышкой и навеской топлива весом 1-2 г.

5. Поместить бюкс с открытой крышкой (как это показано на рисунке) и навеской топлива в сушильный шкаф, предварительно нагретый до 103-105 °С и выдержать при этой температуре 0,5 часа.

6. Закрыть бюкс крышкой, вынуть из шкафа и охладить на воздухе в течение 2-х минут, а затем в эксикаторе до комнатной температуры; взвесить бюкс с крышкой и навеской топлива.

7. Произвести контрольное подсушивание и взвешивание в порядке, указанном в пп. 5, 6. Если масса бюкса после контрольной сушки убывла меньше, чем на 0,001 г., опыт считается законченным, в противном случае повторить



опыт, как это указано в п. 5, 6 до совпадения результатов двух последних опытов с погрешностью менее 0,001 г.

8. Результаты взвешиваний занести в таблицу 1.1.

9. Вычислить аналитическую, рабочую и приведённую влажность топлива, а также относительную погрешность расчёта аналитической влажности. Результаты расчётов занести в таблицу 1.2.

10. Написать выводы по лабораторной работе.

Таблица 1.1

Результаты измерений

№ бюкса	Масса бюкса, г			
	пустого $m_1$	с навеской топлива $m_2$	после первой сушки $m_3$	после контрольной сушки $m_4$
1				
2				
3				

Таблица 1.2

Результаты вычислений

№ бюкса	$\Delta m = m_2 - m_4$ , г	$W^a$ , %	$W^p$ , %	$W^{np}$ , (кг·%)/МДж	$\delta_{W^a}$ , %
1					
2					
3					

### Отчёт по лабораторной работе

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Описание двух видов влаги, содержащейся в твёрдом топливе.
3. Формулы (1.2) - (1.5) для вычисления различных видов влажности и погрешности с описанием входящих в них величин.
4. Принципиальная схема лабораторной установки (рис. 1.1).
5. Таблица 1.1 – Результаты измерений.
6. Таблица 1.2 – Результаты вычислений.
7. Выводы по лабораторной работе.

## Контрольные вопросы

1. Какие различают виды влаги твёрдого топлива?
2. Как определяется внутренняя (аналитическая) влажность твёрдого топлива?
3. Опишите методику определения внешней влажности топлива?
4. Как определяется рабочая влажность топлива?
5. Как определяется приведённая влажность топлива?
6. Как влажность топлива влияет на теплоту его сгорания?
7. Как влажность топлива влияет на температуру его горения?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОЛЬНОСТИ ТОПЛИВА

**Цель работы:** определение зольности аналитической пробы твёрдого топлива, овладение методикой пересчёта её на сухую и рабочую массы, анализ влияния зольности на процесс горения и на работу топочного устройства.

#### Краткие теоретические сведения

Зола представляет собой твёрдый минеральный остаток, остающийся после сжигания топлива, и состоит из топочных шлаков и летучей золы, покидающей топочное устройство с дымовыми газами. Состав шлаков и золы, определяющий их свойства:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , известь  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ , сульфаты  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ . Для количественной оценки содержания минеральных примесей в топливе применяется показатель «зольность» ( $A$ , %). Содержание золы в топливе изменяется от 1 % у древесины до 75 % в горючих сланцах.

Большая зольность снижает теплоту сгорания топлива. Так, при изменении зольности топлива от  $A_1^p$  до  $A_2^p$  теплота сгорания рабочей массы составит:

$$Q_{н2}^p = (Q_{н1}^p + 25 \cdot W^p) \cdot \frac{100 - A_2^p}{100 - A_1^p} - 25 \cdot W^p, \text{ кДж/кг.} \quad (2.1)$$

Снижение теплотворной способности приводит к увеличению расхода топлива и затрат на его перевозку. Кроме того, снижается температура горения, так как часть теплоты расходуется на нагрев шлака.

Зольность твёрдого топлива в аналитической пробе рассчитывают по формуле

$$A^a = \frac{\Delta m_3}{m} \cdot 100, \% \quad (2.2)$$

где  $\Delta m_3$  – масса зольного остатка, г;

$m$  – начальная масса навески топлива, г.

Содержание золы в топливе не является достаточным показателем энергетической ценности топлива, так как топлива с одинаковым содержанием золы часто имеют различную теплоту сгорания. Для сравнительной оценки количества золы используется приведённая зольность топлива:

$$A^{np} = \frac{A^p}{Q_n^p}, \text{ (кг} \cdot \text{ \%)/МДж.} \quad (2.3)$$

где  $A^p$  – рабочая зольность топлива, поступающего в топку, %.  
Зольность топлива на сухую массу рассчитывают по формуле

$$A^c = A^a \cdot \frac{100}{100 - W^a}, \% \quad (2.4)$$

а на рабочую массу по формуле

$$A^p = A^a \cdot \frac{100 - W^p}{100 - W^a}, \% \quad (2.5)$$

где  $W^p$  и  $W^a$  – влажность рабочей массы и аналитической пробы твёрдого топлива, соответственно, %.

Важное практическое значение имеет плавкость золы, характеризующаяся температурами:

- 1)  $t_1$  – начало деформации;
- 2)  $t_2$  – начало размягчения;
- 3)  $t_3$  – начало жидкоплавкого состояния.

Зола разделяется на тугоплавкую ( $t_3 > 1425$  °С), среднеплавкую ( $1200 < t_3 < 1425$  °С), и легкоплавкую ( $t_3 < 1200$  °С).

Характеристики золы необходимо знать при проектировании и эксплуатации топочных устройств. В топочной камере можно организовать сжигание топлив с твёрдым или жидким шлакоудалением.

Твёрдое шлакоудаление организуется при сжигании топлив с тугоплавкой золой или среднеплавкой с небольшим содержанием золы ( $A^{np} < 1$  (кг %)/МДж) и высоким выходом летучих ( $V^r > 25$  %).

Жидкое шлакоудаление целесообразно для топлив с легкоплавкой золой и топлив с малым выходом летучих.

При сжигании твёрдых топлив в топках с твёрдым шлакоудалением значительная часть сухой золы уносится дымовыми газами, что приводит к загрязнению окружающей среды, эрозионному износу поверхностей нагрева, их заносу и загрязнению (шлакованию), удорожанию золоулавливающих устройств.

Сущность метода определения содержания золы в топливе заключается в медленном озолении пробы в муфельной печи и прокаливании зольного остатка в условиях свободного доступа воздуха при температуре 775-825 °С до постоянной массы [2].

Погрешность вычисленного значения аналитической зольности определяется аналогично лабораторной работе № 1 по формуле

$$\delta_{A^a} = \pm \frac{\Delta_g}{m} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

где  $\Delta_g$  – пределы абсолютной допускаемой погрешности аналитических весов, г.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 2.1) состоит из электропечи 1 типа ЭКСП-10В с автоматическим терморегулятором, фарфорового тигля 2 с навеской топлива, эксикатора 3 и аналитических электронных весов (на рисунке не показаны).

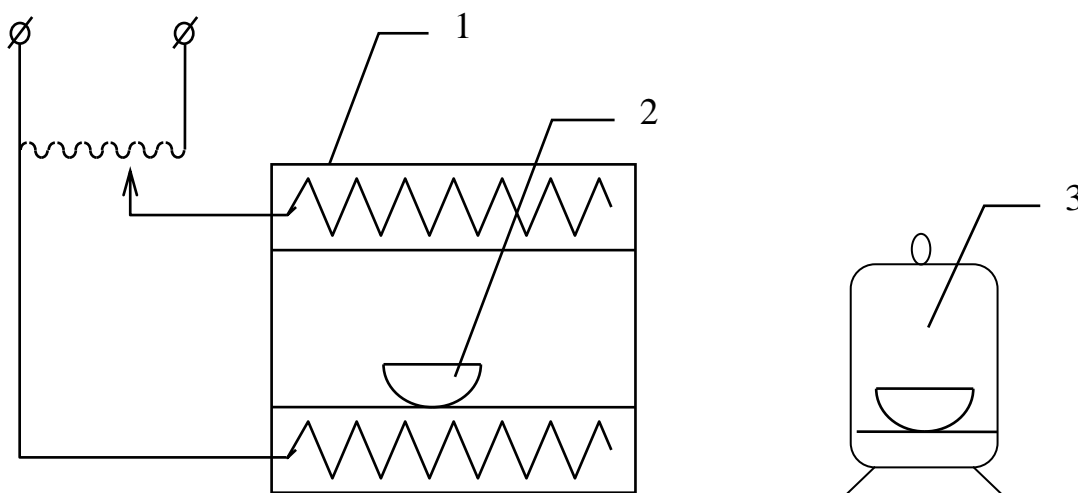


Рис. 2.1. Принципиальная схема лабораторной установки:  
1 – электропечь; 2 – тигель; 3 – эксикатор

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, порядком включения электропечи ЭКСП-10В, установки и выемки из печи тигля, работы с аналитическими электронными весами.

2. Записать технические характеристики основного оборудования и метрологические характеристики средств измерений.

3. Просушить тигель и взвесить его на аналитических весах.

4. Насыпать в тигель анализируемое топливо весом 1-2 г и взвесить тигель с навеской топлива. Вычислить массу навески топлива.

5. Поставить тигель у открытого входа в предварительно нагретую до 775-825 °С электропечь; в таком положении выдержать тигель в течение 10 мин. Это позволяет избежать бурного выделения летучих веществ и уноса из тигля мелких частиц топлива.

6. Передвинуть тигель в зону максимальной температуры (775-825 °С), закрыть дверцу печи. Прокаливать тигель в течение часа.

7. Вынуть тигель из печи, выдержать его на воздухе в течение 5 мин, поместить его в эксикатор, где охладить до комнатной температуры, взвесить тигель.

8. Произвести контрольные прокаливания тигля с зольными остатками продолжительностью 15 мин. каждое до тех пор, пока разность масс при двух последних взвешиваниях будет менее 0,001 г. Порядок контрольных прокаливаний указан в п. 5-7.

9. Результаты взвешиваний занести в таблицу 2.1.

10. Вычислить аналитическую, рабочую, сухую и приведённую зольность топлива, а также относительную погрешность расчёта аналитической зольности. Результаты расчётов занести в таблицу 2.2.

11. Написать выводы по лабораторной работе.

Таблица 2.1

### Результаты измерений

№ тигля	Масса тигля, г			
	пустого $m_1$	с навеской топлива $m_2$	после первого прокаливания $m_3$	после контрольного прокаливания $m_4$
1				
2				
3				

## Результаты вычислений

№ тигля	$\Delta m_3 = m_4 - m_1,$ г	$A^a, \%$	$A^p, \%$	$A^c, \%$	$A^{np},$ (кг·%)/МДж	$\delta_{A^a}, \%$
1						
2						
3						

**Отчёт по лабораторной работе**

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Формулы (2.2) - (2.6) для вычисления различных видов зольности и погрешности с описанием входящих в них величин.
3. Описание трёх характерных температур плавкости золы и трёх видов золы в зависимости от температуры  $t_3$ .
4. Принципиальная схема лабораторной установки (рис. 2.1).
5. Таблица 2.1 – Результаты измерений.
6. Таблица 2.2 – Результаты вычислений.
7. Выводы по лабораторной работе.

**Контрольные вопросы**

1. Как определяется зольность в аналитической пробе топлива?
2. Как определяется зольность в рабочей массе топлива?
3. Как определяется зольность в сухой массе топлива?
4. Как определяется приведённая зольность топлива?
5. Как зольность топлива влияет на его теплоту сгорания?
6. Как зольность топлива влияет на температуру его горения?
7. Как определяется температура плавкости золы?
8. От чего зависит вид системы золоудаления?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА НА ЭВМ

**Цель работы:** изучение влияния коэффициента избытка воздуха и температуры воздуха (окислителя) на процесс горения различных видов топлива с применением программного обеспечения.

#### Краткие теоретические сведения

Основной задачей расчёта горения топлива является составление уравнений материального и теплового балансов процесса горения [3, 4].

Материальный баланс служит для определения необходимого количества воздуха для полного сгорания 1 кг (1 м<sup>3</sup>) топлива и объёма образующихся при этом продуктов сгорания. На основании стехиометрических уравнений горения теоретический расход воздуха для сгорания 1 кг твёрдого или жидкого топлива определяется по формуле

$$V_g^o = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S_{o+k}^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3.1)$$

Аналогично для газообразного топлива:

$$V_g^o = 0,0476 \cdot [0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum_{i=1}^n \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.2)$$

Продукты полного сгорания топлива содержат 3-х атомные газы (SO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>) и водяной пар (H<sub>2</sub>O). Теоретический объём продуктов сгорания определяется из соотношения

$$V_z^o = V_{RO_2} + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (3.3)$$

где  $V_{RO_2}$ ,  $V_{N_2}^o$ ,  $V_{H_2O}^o$  – теоретический выход 3-х атомных газов, азота и водяного пара, соответственно, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>).

При сжигании твёрдого или жидкого топлива теоретический выход компонентов продуктов сгорания определяется по следующим формулам:

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S_{o+k}^p), \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3.4)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot V_g^o + 0,008 \cdot N^p, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (3.5)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3.6)$$

Аналогично при сжигании газообразного топлива:

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum m \cdot C_m H_n), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (3.7)$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 \cdot V_g^o + 0,01 \cdot N_2, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (3.8)$$

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot \left( H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,124 \cdot d_c \right) + 0,0161 \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.9)$$

Действительный выход продуктов сгорания, т.е. их объём при сжигании топлива с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha > 1$ , определяется из соотношения:

$$V_c = V_c^o + (\alpha - 1) \cdot V_g^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (3.10)$$

Целью расчёта теплового баланса процесса горения является определение температуры горения, которая зависит от теплоты сгорания топлива, физической теплоты компонентов горения, коэффициента избытка воздуха, степени диссоциации продуктов сгорания и величины тепловых потерь.

Температура горения топлива – это температура, которую имеют продукты сгорания на выходе из зоны горения. Она может быть калориметрической, теоретической и действительной.

На практике действительная температура горения определяется по формуле:

$$t_o = t_k \cdot \eta_{nup}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.11)$$

где  $t_k$  – калориметрическая (адиабатная) температура горения,  $^\circ\text{C}$ ;  $\eta_{nup}$  – пирометрический коэффициент установки.

Калориметрическая температура горения рассчитывается без учёта эндотермических реакций диссоциации продуктов сгорания и тепловых потерь. Она может быть определена из следующих уравнений:

$$h_c \Big|_{t=t_k} = Q_H^p + Q_{ф.к.}, \text{ кДж/кг} (\text{кДж/м}^3); \quad (3.12)$$

$$h_c = V_{RO_2} \cdot (CV)_{RO_2} + V_{H_2O} \cdot (CV)_{H_2O} + V_{N_2} \cdot (CV)_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot V_g^o \cdot (CV)_g, \text{ кДж/кг} (\text{кДж/м}^3), \quad (3.13)$$



где  $Q_n^p$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  
 $Q_{ф.к.}$  – физическая теплота компонентов горения, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  
 $h_2$  – энтальпия продуктов сгорания топлива, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  
 $CV$  – удельная энтальпия соответствующего компонента в продуктах сгорания и воздуха (определяется при температуре  $t_k$ ), кДж/м<sup>3</sup>.

При оценке теплотворной способности топлива может также применяться параметр «жаропроизводительность». Под ним понимают максимальную температуру горения, развиваемую при полном сгорании топлива, в условиях, когда всё выделяющееся тепло расходуется на нагрев образующихся продуктов полного сгорания, без учёта процесса их диссоциации.

### Описание программы

Программа реализует алгоритм, соответствующий расчётным зависимостям (3.1 - 3.13). На рис. 3.1 представлена схема алгоритма.

В блоке 1 производится ввод исходных данных:  $Q_n^p$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>);  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха; 3)  $t_g$  – температура воздуха, подаваемого на горение, °С; 4)  $N$  – число, соответствующее виду сжигаемого топлива. Если  $N=1$ , то сжигается твёрдое (жидкое) топливо, если  $N=2$  – газообразное топливо.

В блоке 2 в соответствии с численным значением числа  $N$  управление передаётся на блок 3 или 5, соответственно. Затем в блоках 4 или 6 вычисляются объёмы трёхатомных газов, азота и водяных паров, а в блоке 7 – объём продуктов сгорания. В блоках 8 и 9 вычисляется теплота, вносимая в зону горения с топливом и воздухом, и энтальпия продуктов сгорания. Вычисление калориметрической температуры горения осуществляется методом последовательных приближений в цикле из блоков 9-11.

При исследовании зависимости калориметрической температуры от  $\alpha$  и  $t_g$ , вводятся новые значения этих величин и управление передаётся на блок 7 (на рисунке не показано).

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомившись с алгоритмом и текстом программы, ввести её в память ЭВМ (персонального компьютера).

2. Проверить правильность ввода тестированием с помощью контрольного примера.

3. Для заданного топлива провести исследование зависимостей калориметрической температуры горения от коэффициента избытка воздуха и его температуры (вид топлива и диапазон варьирования исходных параметров задаётся преподавателем).

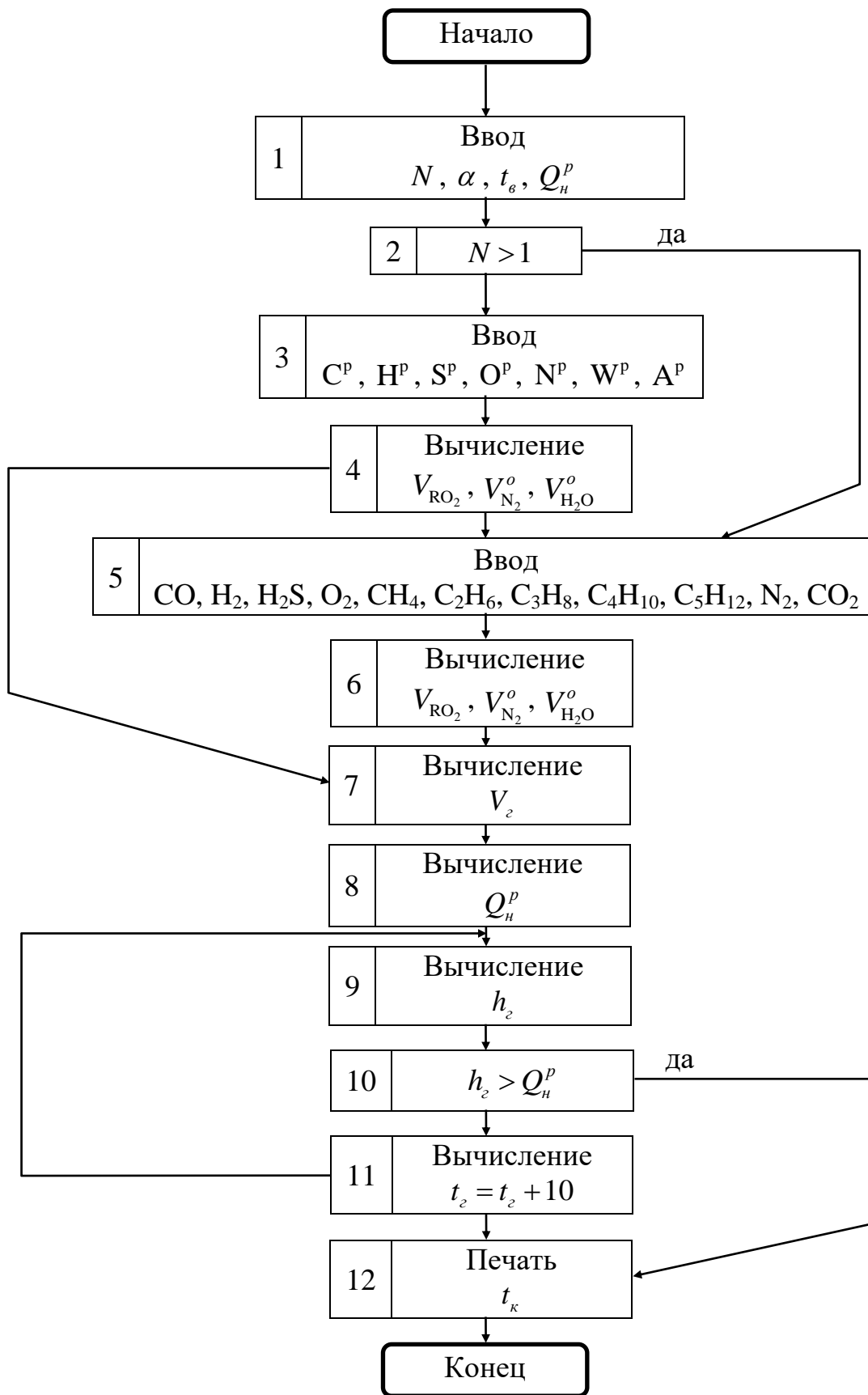


Рис. 3.1. Схема алгоритма

4. Результаты расчётов занести в таблицу 3.1.

5. На основании приведённых расчётов построить графики зависимостей  $t_k = f_1(\alpha)$ ;  $t_k = f_2(t_g)$ .

6. Написать выводы по лабораторной работе.

Таблица 3.1

Результаты вычислений

Параметры горения	$\alpha = \underline{\hspace{1cm}}$	$\alpha = \underline{\hspace{1cm}}$	$\alpha = \underline{\hspace{1cm}}$	$\alpha = \underline{\hspace{1cm}}$
		$t_g = \underline{\hspace{1cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$		
$t_k, \text{ } ^\circ\text{C}$				
$V_2, \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (м}^3/\text{м}^3)$				
	$t_g = \underline{\hspace{1cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$			
$t_k, \text{ } ^\circ\text{C}$				
$V_2, \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (м}^3/\text{м}^3)$				
	$t_g = \underline{\hspace{1cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$			
$t_k, \text{ } ^\circ\text{C}$				
$V_2, \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (м}^3/\text{м}^3)$				
	$t_g = \underline{\hspace{1cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$			
$t_k, \text{ } ^\circ\text{C}$				
$V_2, \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (м}^3/\text{м}^3)$				

**Отчёт по лабораторной работе**

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Формулы (3.1) - (3.13) для вычисления расхода воздуха, объёма и энтальпии продуктов сгорания с описанием входящих в них величин.
3. Таблица 3.1 – Результаты вычислений.
4. Графики зависимостей  $V_2 = f_1(\alpha)$ ;  $t_k = f_2(\alpha)$ .
5. Выводы по лабораторной работе. Выводы должны содержать анализ построенных зависимостей.

**Контрольные вопросы**

1. Как определяется теоретический и действительный расход воздуха?
2. От чего зависит расход воздуха?
3. Из каких компонентов состоят продукты сгорания органического топлива? От чего зависит их объём?

4. Что называется температурой горения топлива? От чего она зависит?
5. Что называется жаропроизводительностью топлива?
6. Как определяется энтальпия продуктов сгорания?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ФОРСУНКИ ФУЗ «ФАКЕЛ»

**Цель работы:** изучить принципиальную схему и конструкцию паромеханической форсунки ФУЗ «Факел» и отдельных её элементов, понять принцип её работы, рассчитать радиус капли мазута.

#### Краткие теоретические сведения

Поскольку все виды жидкого топлива сгорают в паровой фазе, то его распыливание (дробление) на мелкие капли является основным способом интенсификации процесса горения и снижения химического недожога. Для распыливания жидкого топлива применяют форсунки, которые по принципу действия делятся на три группы:

- механические;
- ротационные (вращающиеся);
- пневматические (высокого и низкого давления).

В механических форсунках используется энергия самой струи топлива, а весь воздух, необходимый для горения, подаётся непосредственно в зону горения. При этом процесс горения протекает более эффективно, если струя топлива перед соплом закручивается за счёт тангенциального её подвода.

В ротационных форсунках распыливание топлива происходит за счёт центробежной силы, создаваемой быстро вращающимся ротором.

В пневматических форсунках для распыливания топлива используется энергия распыливающего агента, в качестве которого используется воздух или водяной пар (насыщенный или перегретый).

Максимальный радиус капли на выходе из пневматической форсунки может быть ориентировочно определён из соотношения, приведённого в [3]:

$$R = \frac{255}{\rho_c \cdot w^2}, \text{ мм}, \quad (4.1)$$

где  $\rho_c$  – плотность распыливающего агента на выходе из сопла, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – относительная скорость капли по отношению к окружающей среде, м/с.

## Описание ультразвуковой форсунки «Факел»

Форсунка «Факел» относится к пневматическим форсункам высокого давления. В качестве распыливающего агента в ней используется насыщенный или перегретый водяной пар давлением не менее 0,8 МПа. Избыточное давление мазута перед форсункой должно составлять не менее 0,3 МПа, а его вязкость – не более 10 °ВУ, что соответствует температуре от 80 до 100 °С.

Зависимость плотности водяного пара от давления (температуры) приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Зависимость плотности насыщенного пара от давления (температуры)

$t_c, ^\circ\text{C}$	$P_c, \text{кПа}$	$\rho_c, \text{кг/м}^3$
150	475,8	2,547
160	618,0	3,258
170	792,6	4,122
180	1003,6	5,157
190	1255,7	6,394
200	1555,9	7,862
210	1909,0	9,588
220	2321,0	11,620

В форсунке «Факел» реализован комбинированный способ распыливания топлива, совмещающий использование эффекта закрученной струи жидкости, кинетической энергии вихревого потока распылителя и акустических колебаний среды.

Общий вид форсунки «Факел» приведён на рис. 4.1.

Корпус 1 и сопло 4 изготовлены из нержавеющей стали; паровой излучатель 3 и топливный завихритель 2 – из высококачественной стали с упрочнением поверхностного слоя; основание 6 – из углеродистой конструкционной стали.

Паровой излучатель является генератором акустических колебаний широкого спектра и включает в себя спиралевидные каналы, геометрия которых рассчитана по определённой математической зависимости.

Форсунка работает следующим образом:

1) топливо (мазут) по центральной трубе подаётся в отверстия топливного завихрителя 2 и в виде закрученного потока поступает в центральную полость форсунки;

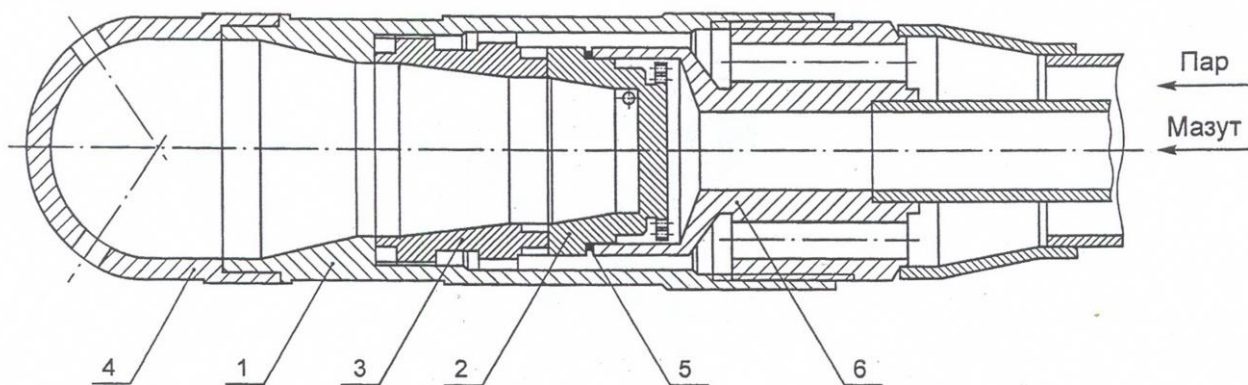


Рис. 4.1. Форсунка «Факел» со стволом:

1 – корпус; 2 – топливный завихритель; 3 – паровой излучатель; 4 – сопло;  
5 – медная прокладка; 6 – основание

2) распылитель (пар) проходит по периферии к каналам парового излучателя 3, достигая при выходе из каналов звуковых и сверхзвуковых скоростей истечения;

3) взаимодействие высокоскоростных потоков распылителя приводит к возникновению акустических колебаний, которые значительно усиливают процесс дробления мазута и перемешивания его с паром в вихревых потоках;

4) на выходе из сопла 4 происходит формирование факела с углом раскрытия от 90 до 115 градусов и дальнейшее распространение акустических колебаний.

Паро-акустические форсунки «Факел» обеспечивают высокоэффективное сжигание мазута в энергетических котлах. Их применение приводит к следующим положительным эффектам:

- снижению расхода топлива;
- снижению вредных выбросов в атмосферу;
- повышению КПД котла.

Технические характеристики форсунки приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Технические характеристики форсунки

Давление пара, МПа	0,9-1,1			1,2-1,4		
Давление мазута, МПа	0,5	0,7	1,1	1,2	1,5	2,0
Тип форсунки	Производительность, кг/час $\pm$ 1,5 %					
ФУЗ-1200	552	705	947	988	1105	1260

Крепление форсунки к стволу производится в следующей последовательности:

- вынуть из корпуса 1 топливный завихритель 2;
- завихритель 2 совместно с прокладкой 5 вставить в основание 6;
- навернуть корпус 1 с находящимся внутри излучателем 3 на основание, предварительно отвернув сопло 4;
- произвести контроль сборки: детали 1 и 3, 3 и 2 должны соприкоснуться между собой торцевыми поверхностями и не перемещаться внутри корпуса;
- навернуть сопло 4.

Форсунка «Факел» в сборке со стволом устанавливается в горелку аналогично штатной форсунке.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить принципиальную схему форсунки «Факел» и конструктивные особенности отдельных её элементов.
2. Произвести разборку и сборку форсунки.
3. Изучив технические характеристики форсунки для заданных параметров пара рассчитать радиус капли мазута на выходе из форсунки в зависимости от скорости скорости капли по отношению к окружающей среде.
4. Результаты расчётов занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

Результаты вычислений

$P_c = \text{___ МПа}$		$P_c = \text{___ МПа}$	
$w, \text{ м/с}$	$R, \text{ мм}$	$w, \text{ м/с}$	$R, \text{ мм}$
16		40	
20		44	
24		48	
28		52	
32		56	
36		60	

5. На основании приведённых расчётов построить зависимость  $R = f(w)$ .
6. Написать выводы по лабораторной работе.

### Отчёт по лабораторной работе

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель работы.

2. Принцип работы трёх видов форсунок.
3. Формула (4.1) для вычисления радиуса капли мазута с описанием входящих в неё величин.
4. Таблица 4.3 – Результаты вычислений.
5. График зависимости  $R = f(w)$ .
6. Выводы по лабораторной работе. Выводы должны содержать анализ построенной зависимости.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите назначение форсунок.
2. Назовите три вида форсунок и поясните принцип их работы.
3. Назовите основные элементы форсунки «Факел», поясните их назначение.
4. Поясните принцип действия форсунки.
5. Назовите основные технические характеристики форсунки.
6. Как производится регулирование производительности форсунки?
7. От чего зависит размер капли мазута?



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 11014-2001. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренные методы определения влаги. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 7 с.
2. ГОСТ 11022-95. Топливо твёрдое минеральное. Методы определения зольности. – М.: Стандартиформ, 2006. – 8 с.
3. Хзмалян, Д. М. Теория горения и топочные устройства: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Д. М. Хзмалян, А. Я. Каган; Под ред. Д. М. Хзмаляна. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
4. Бараков, А. В. Основы практической теории горения: учеб. пособие / А. В. Бараков, В. Ю. Дубанин, Д. А. Прутских. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009. – 122 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Определение влажности топлива.....	5
Лабораторная работа № 2. Определение зольности топлива.....	9
Лабораторная работа № 3. Исследование процесса горения топлива на ЭВМ.....	14
Лабораторная работа № 4. Изучение конструкции и принципа действия форсунки ФУЗ «Факел».....	19
Библиографический список.....	24

# **ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления 13.03.01  
«Теплоэнергетика и теплотехника»  
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)  
всех форм обучения

### **Составители:**

**Бараков Александр Валентинович**

**Надеев Александр Александрович**

**Редактор**

Подписано в печать **25.01.2021.**

Формат 60×84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Уч.-изд. л. **1,6.** Усл. печ. л. **1,6.** Тираж **60** экз. Зак. №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394026 Воронеж, Московский просп., 14