



Научная статья  
УДК 629.13,621.783, 629.422

## ТЕПЛО-МАССООБМЕН ЛЕТУЧИХ С ВОЗДУХОМ В ТОПКЕ ПАРОВОЗА

Е.А. Оленев<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

\*E-mail: [olenevea@mail.ru](mailto:olenevea@mail.ru)

**Аннотация.** Разработана математическая модель смешивания летучих с воздухом в топке паровоза. Эта модель позволяет определять необходимый объем топочного пространства для более полного сжигания твердых топлив, например каменных углей.

**Ключевые слова:** *теплота; летучие; сжигание твердого топлива; топка.*

**Для цитирования:** Оленев Е.А. Тепло-массообмен летучих с воздухом в топке паровоза // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №3. С. 59–70.

Originalarticle

## HEAT-MASS EXCHANGE OF VOLATILE WITH AIR IN THE CARRIAGE FURNACE

Е.А. Olenev<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, Vladimir, Russia

\*E-mail: [olenevea@mail.ru](mailto:olenevea@mail.ru)

**Abstract.** A mathematical model has been developed for mixing volatiles with air in a steam locomotive furnace. This model allows you to determine the required amount of furnace space for a more complete combustion of solid fuels, such as coal.

**Keywords:** *heat; volatiles; solid fuel combustion; furnace.*

**Forcitation:** Olenev E.A. Heat-mass exchange of volatile with air in the carriage furnace. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9. No. 3. pp. 59–70.

### Введение

Российская Федерация располагает значительными балансовыми запасами угля (более 200 млрд. т), что составляет 12% мировых. Реально разведано 105 млрд т.е., геологические ресурсы углей оцениваются в 4450 млрд т (30% мировых). Очевидно, что структура расходуемого в стране топлива должна изменяться в сторону увеличения потребления угля.

Работа энергоемкого железнодорожного транспорта в настоящее время ведется преимущественно на электрической и дизельной тяге, в результате чего такое доступное и относительно дешевое топливо как каменный уголь остается не востребованным, если не считать использование его на ТЭЦ, вырабатывающую электрическую энергию для электровоза. Крупный недостаток паровозов заключался в тяжелых условиях работы паровозной бригады. При эксплуатации паровоза большая часть рабочего времени затрачивалась на ведение топочного процесса, приготовление нужного в данный момент количества пара и на осуществ-

ление контроля над котлом. Естественно, сейчас такие условия работы вряд ли могут оказаться привлекательными и приемлемыми. Однако применение новых современных технологий, в том числе, и информационных, позволяет усовершенствовать тепловую и механическую работу паровоза, повысить его КПД, и создать условия для паровозной бригады не менее комфортными, чем на тепловозах и электровозах. Рассмотрим процесс сжигания твердого топлива в топке паровоза и определим пути повышения качества топочного процесса.

### 1. Выделение летучих в топочном пространстве

Академиком Сыромятниковым С.П. [1] было показано, что «камеры догорания, устанавливаемые на мощных паровозах, не оправдывают своего названия и мало влияют на величину химической неполноты сгорания», т.е. часть летучих не успевает сгореть и уходит в трубную часть котла. Обратимся к работе [2], в которой был дан пример расчета температуры в топке мощного советского паровоза ФД. На рис. 1 представлены кривые температур топочного пространства.

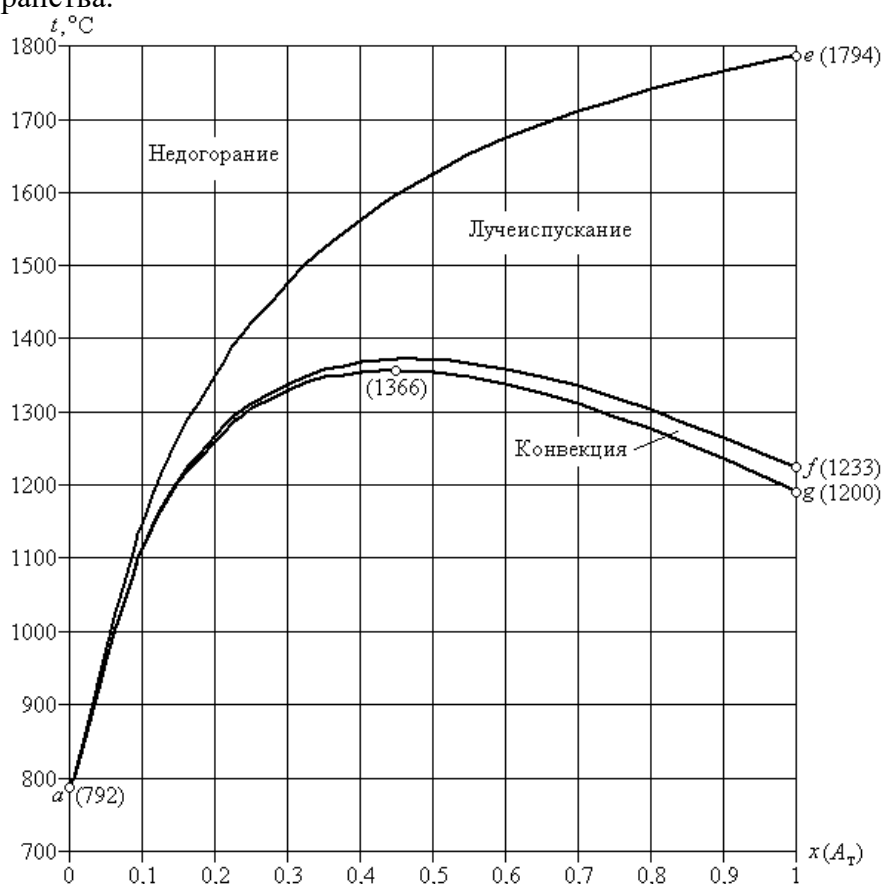


Рисунок 1 – Семейство кривых температур топочного пространства

Кривая  $ae$  соответствует изменению действительной температуры  $t_1$  и показывает, какая температура могла бы развиться в топке при сжигании топлива и отсутствии теплообмена с окружающей средой. Она является результатом вычетов из величины теоретической температуры значений потерь от недогорания. Кроме того, эта кривая показывает темп догорания выделившихся из топлива летучих. Как видно из графика в начале процесса горения летучие не успевают смешаться с воздухом, поэтому нарастание температуры в объеме топочного пространства идет сравнительно медленно, и температура могла бы достигнуть какого-то своего максимального значения только в конце топки. Однако это по существу теоретическая кривая, поскольку в результате интенсивного теплообмена с холодными стенками топки, омываемыми снаружи котловой водой, температура в топке только за счет излуче-

ния (кривая  $af$ ) достигает своего максимума ближе к середине, а затем падает. Кривой  $af$  соответствуют величины температур, устанавливающиеся в результате отдачи тепла излучением. Поскольку кроме излучения в топке происходит передача теплоты и конвекцией, то действительная температура топочного пространства становится еще ниже, и кривая ( $ag$ ) отражает закон изменения действительной температуры топочного пространства.

Таким образом, отрезки ординат между горизонталью, имеющей ординату порядка  $2000^{\circ}\text{C}$  (теоретической температуры горения топлива), и кривой  $ae$  соответствуют величинам температурных вычетов, обусловленных потерями горения; отрезки между кривыми  $ae$  и  $af$  представляют собой температурные вычеты в результате отдачи тепла излучением, а между кривыми  $af$  и  $ag$  – конвекционной теплоотдачи.

Как видно из приведенного рисунка, максимальная действительная температура топочного пространства чуть больше  $1300^{\circ}\text{C}$ . Сравнивая работу паровозных топков, академик Сыромятников С.П. писал, что даже при очень форсированной работе температура в топке едва достигает  $1500^{\circ}\text{C}$ .

Согласно закону Аррениуса константа скорости реакции с температурой связана следующим уравнением

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1)$$

где  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $e = 2,71828$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная  $8,31441 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$ ;  $E$  – энергия активации,  $\text{Дж}/(\text{моль})$ ;  $T$  – абсолютная температура,  $\text{К}$ .

Из уравнения (1) видно, что с увеличением температуры растет константа скорости реакции. При этом скорость химической реакции сильнее изменяется с температурой в тех реакциях, у которых энергия активации выше. В топку паровоза уголь поступает различными по величине фракциями (кусочками), в том числе и в виде мелкой пыли, образующейся в результате трения угольных кусочков друг об друга.

Исходя из закона Аррениуса и равенства критериев [3], рассмотрим условие перехода горения в диффузионную область для сравнительно крупного помола (диаметр угольного шарика  $d_1 = 10 \text{ мм}$ ) и мелких частиц ( $d_2 = 10, 100$  и  $1000 \text{ мкм}$ )

$$\frac{k_0 e^{-\frac{E}{RT_1}}}{D_1} d_1 = \frac{k_0 e^{-\frac{E}{RT_2}}}{D_2} d_2, \quad (2)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  соответственно коэффициент диффузии, относящийся к угольному шарiku и к частице,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

Согласно кинетической теории газов зависимость коэффициента молекулярной диффузии от температуры и давления определяется выражением

$$\frac{D}{D_0} = \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5} \cdot \frac{p_0}{p}, \quad (3)$$

где  $D_0$  и  $p_0$  – соответственно коэффициент диффузии и давление в нормальных условиях,  $D$  и  $p$  – в условиях взаимодействия газов.

Принимая давление в топке паровоза  $p \approx p_0$  и подставляя значение коэффициента диффузии из выражения (3) в уравнение (2), получим

$$-\frac{E}{RT_1} + \ln\left(\frac{d_1}{T_1^{1,5}}\right) = -\frac{E}{RT_2} + \ln\left(\frac{d_2}{T_2^{1,5}}\right) \quad (4)$$

Логарифмируя это уравнение, будем иметь

$$\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) + 1,5\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 0, \quad (5)$$

где связь между двумя температурами задается выражением

$$\frac{T_2}{T_1} = f\left(\frac{E}{RT_1}; \frac{d_2}{d_1}\right). \quad (6)$$

На рис. 2 показана зависимость  $\frac{T_2}{T_1} = f\left(\frac{E}{RT_1}; \frac{d_2}{d_1}\right)$ .

Анализ полученных решений показывает, что если для угольных шариков размером 10 мм при  $E = 167,48$  кДж/моль диффузионное горение имеет место уже при температуре 1200 – 1300 К, то для угольных частиц диаметром менее 100 мкм получаем по графику отношение  $\frac{T_2}{T_1} = 1,4 - 2$ . Поэтому процесс перехода горения в диффузионную область будет проходить при температурах 1750 – 2500 К, что свидетельствует о том, что данная область резко ограничивается и практически имеет место для частиц с диаметром более 100 мкм.

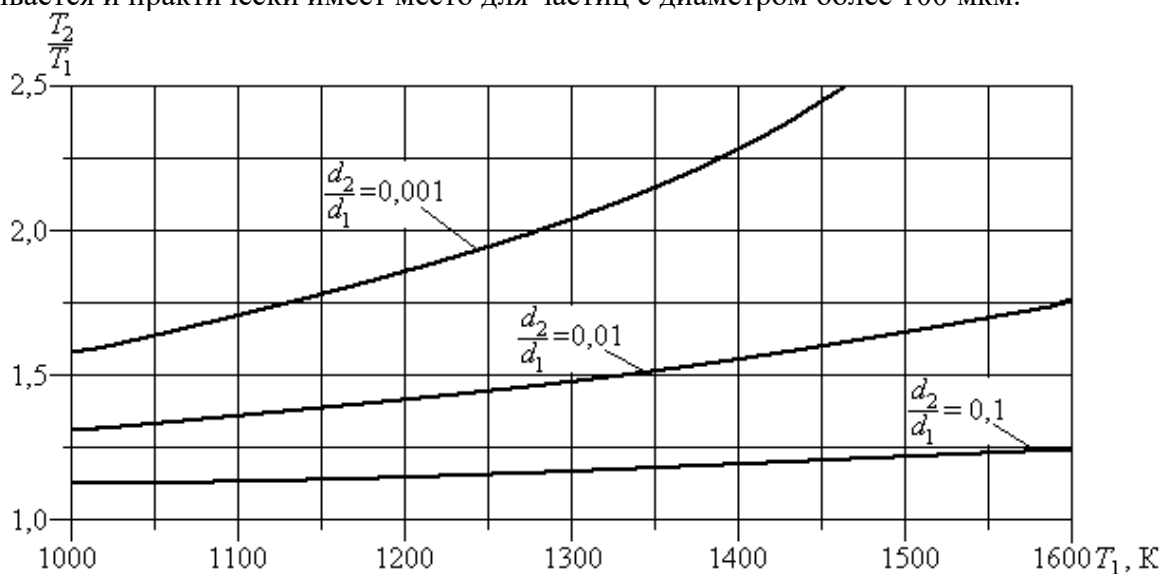


Рисунок 2 – Зависимость  $\frac{T_2}{T_1} = f\left(\frac{E}{RT_1}; \frac{d_2}{d_1}\right)$ .

Поэтому вплоть до самых высоких температур горение будет проходить в кинетической области горения, которая отличается сильной зависимостью скорости горения от температуры. Поскольку, как уже отмечалось, в топке развивается максимальная температура порядка 1600 – 1750К, то угольная пыль не успевает прореагировать в кинетической области и уносится продуктами горения из топки, чем и объясняется черный дым из трубы паровоза.

Отсюда напрашивается вывод, что желательно поднять температуру в топке паровоза для увеличения скорости реакции топлива с воздухом, при этом к моменту достижения максимальной температуры желательно уже смешать летучие с воздухом, для образования горючей смеси.

Как видно из рис. 1, температура у колосниковой решетки составляет величину менее 800°C при достаточно высокой форсировке (2300 кг/ч), при меньших значениях форсировки эта температура может опуститься до 700 – 600°C. При температурах до 700°C летучие выделяются у всех топлив, но не полностью. После этой температуры имеется глубокий минимум выделения, доходящий почти до нуля, после чего вновь появляются летучие, образуя максимум в интервале 900 – 1000°C [4]. Примерный состав (в процентах по объему) летучих в процессе их выхода при температуре 580°C следующий: CO<sub>2</sub> – 14,3; N<sub>2</sub> – 5,3; H<sub>2</sub> – 6,7; CO – 7,3; CH<sub>4</sub> – 59,1; C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) – 6,7; H<sub>2</sub>S – 0,6 [5].

В составе летучих большая часть принадлежит метану, который является наиболее устойчивым соединением среди углеводородов и поэтому может образовываться в больших количествах при газификации твердых топлив. Что касается тяжелых углеводородов то, поскольку состав их не известен, вместо C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> принято принимать в качестве эквивалента этилен C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> или пренебрегать ими вовсе в случае небольшого их содержания в газе. При сжигании 1 м<sup>3</sup> газа в воздухе образуется определенное количество продуктов сгорания. Данные о горении простых газов приведены в таблице.

Таблица – Данные о горении простых газов

Газ	Реакция горения	Расход, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>		Количество продуктов сгорания, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>		
		кислорода	воздуха	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
Водород	H <sub>2</sub> + 0,5O <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O	0,500	2,381	–	1,000	1,881
Окись углерода	CO + 0,5O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub>	0,500	2,381	1,000	–	1,881
Метан	CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	2,000	9,524	1,000	2,000	7,524
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 3O <sub>2</sub> = 2CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	3,000	14,286	2,000	2,000	11,286
Сероводород	H <sub>2</sub> S + 1,5O <sub>2</sub> = SO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	1,500	7,143	1,000 (SO <sub>2</sub> )	1,000	5,643

В соответствии с табл. теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания газов будет равно(м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>)

$$V_0 = 4,76 \cdot 10^{-2} [0,5(6,7 + 7,3) + (2 + 0,25 \cdot 4)6,7 + (1 + 0,25 \cdot 4)59,1 + 1,5 \cdot 0,6] = 6,96 \text{ т.е. для сжигания летучих требуется достаточно большое количество воздуха, который желательно предварительно нагреть. Если предварительного нагрева воздуха нет, то температура его до начала смешивания с летучими повышается только при прохождении им слоя раскаленного топлива, сгорающего на колосниковой решетке, поскольку в воздухе содержится очень малое количество трехатомных газов (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), и тепловым излучением он не нагревается.}$$

Основная линия поглощения метана лежит в области 3,2 – 3,4 мкм, что соответствует максимуму мощности излучения при температурах от 905 до 852 К. Температура начала выхода летучих углей начинается от 300°C и заканчивается для первого этапа, как уже говорилось, к 700°C. Поэтому даже при минимальной температуре в зоне колосниковой решетки выход летучих на первом этапе по существу будет обеспечен, метан еще дополнительно при этом будет нагреваться тепловым излучением.

В энергетическом отношении для водяного пара наиболее важное значение имеют следующие полосы [6]: 1-я полоса от λ = 2,24 до λ = 3,27 мкм, 2-я полоса от λ = 4,8 до λ = 8,5 мкм. Согласно закону Планка максимум мощности излучения для указанных диапазонов волн будет соответственно находиться в диапазонах температур от 1294 до 886 К и от 603 до 341 К и, следовательно, полосы поглощения метана перекрываются с областью поглощения воды, которая может содержаться как во влажном топливе, так и получаться в результате протекания реакции горения.

Для более полного и качественного сжигания летучих необходимо стремиться к

быстрому их смешиванию с воздухом и получению при этом как можно более высокой температуры горючей смеси, поскольку с ростом температуры значительно возрастает предэкспоненциальный множитель  $k_{0i}$ , следовательно, – константа скорости реакции. В работе [7] произведен расчет величины предэкспоненциального множителя в зависимости от температуры летучих. Для наглядности эта зависимость представлена в виде графика на рис. 3.

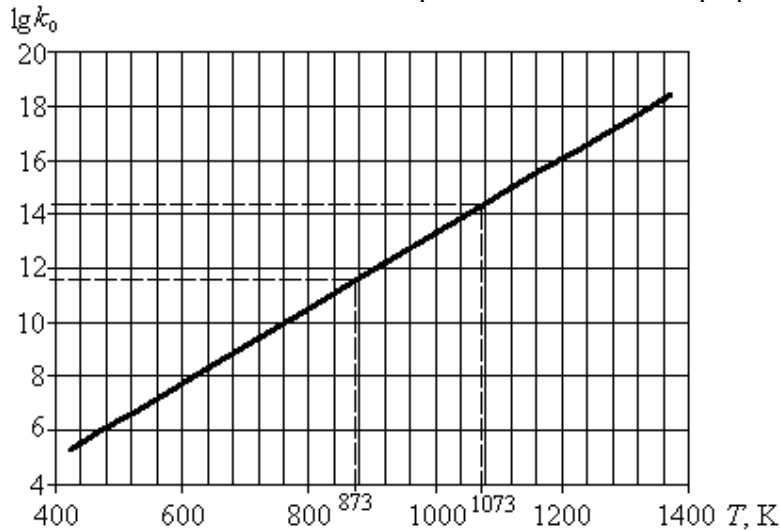


Рисунок 3 – Зависимость предэкспоненциального множителя от температуры летучих

Как видно из рисунка 3, если температуру (873 К) у колосниковой решетки поднять хотя бы на 200 градусов (1073 К), то предэкспоненциальный множитель возрастет более чем в 600 раз.

Рассмотрим смешение летучих с воздухом, движущихся в топке паровоза.

## 2. Постановка задачи

Пусть в сечении 0-0 у поверхности топлива, сгорающего на колосниковой решетке, происходит выделение летучих, которые смешиваясь с проходящим сквозь засыпку топлива воздухом, образуют горючую смесь. При этом летучие имеют скорость  $u_0$ , а окружающий их воздух – скорость  $v_0$ . В процессе движения летучие смешиваются с воздухом (растворяется в нем), образуя смесь (рис. 4). Требуется найти зависимость между давлением  $p$  в сечении  $x$  и начальным давлением  $p_0$  в сечении 0-0, а также определить расстояние, на котором произойдет смешение летучих с воздухом до заданного значения порозности (объем среды, окружающий перемешанные летучие, на единицу объема пространства в данном сечении).

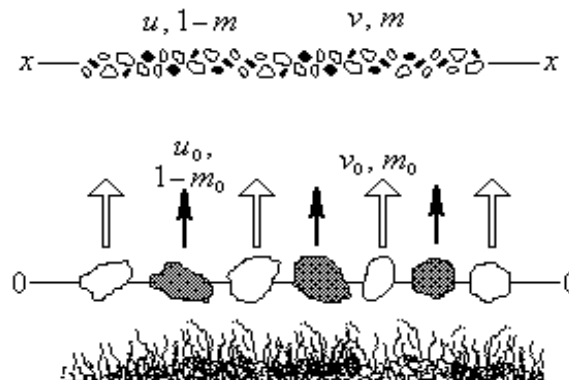


Рисунок 4 – Смешение летучих с воздухом

### 3. Определение параметров потока газов в топке

Смешения летучих с воздухом происходит в процессе их движения в пространстве топки, при этом летучие проникают в окружающий объем смешиваемой смеси путем молекулярной диффузии турбулентных пульсаций. Скорость этого смешения (проникновения) будет зависеть от величины поверхности соприкосновения  $S$  объемов неперемешанных летучих и окружающей их смеси, от разности концентраций в указанных объемах и смеси, а также от интенсивности массообмена.

Исходя из закона сохранения массы, запишем

$$\rho_{\text{л}}u_0(1 - m_0) + \rho_{\text{в}}v_0m_0 = \rho_{\text{см}}vm + \rho_{\text{л}}u(1 - m); \quad (7)$$

$$\rho_{\text{л}}u_0(1 - m_0) = \rho_{\text{л}}u(1 - m) + Cvm, \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{л}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_{\text{см}}$  – плотность летучих, воздуха и смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;  $u$ ,  $v$  – средние скорости движения летучих и смеси в данном сечении (нулевой индекс соответствует исходному сечению, в котором происходит выход летучих, еще неперемешанных с воздухом),  $\text{м/с}$ ;  $m_0$  и  $m$  – порозность в исходном и данном сечении;  $C$  – массовая концентрация летучих в смеси,  $\text{кг/м}^3$ .

Скорость смешения в бесконечно малом объеме выразится

$$-\frac{d(Cvm)}{dx} = Sq, \quad (9)$$

где  $S$  – величина поверхности (на единицу объема пространства) объемов неперемешанных летучих и окружающей их смеси, зависящая от порозности и среднего радиуса  $r$  объема неперемешанных летучих в данном сечении,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $q$  – интенсивность массообмена,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Знак минус указывает, что градиент концентрации отрицательный. Полагая, что молекулярная диффузия действует во всем объеме неперемешанного дыма, примем  $\delta \approx r/3$ .

Величины  $S$  и  $q$  могут быть выражены [8]

$$S = \frac{3(1-m)}{r} = \frac{1-m}{\delta}. \quad (10)$$

$$q = \frac{\beta}{1 + \frac{\beta\delta}{D}} (\rho_{\text{л}} - C), \quad (11)$$

где  $\beta$  – суммарный коэффициент массообмена,  $\text{м/с}$ ;  $\delta$  – толщина слоя, в который летучие проникают в смесь путем молекулярной диффузии и турбулентных пульсаций,  $\text{м}$ ;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Из уравнения состояния газовой среды для сечения на расстоянии  $x$  можно записать

$$p = \rho_x R_x T_x, \quad (12)$$

где  $p$  – среднее давление в потоке газов на расстоянии  $x$  от сечения 0-0;  $\rho_x$ ,  $R_x$ ,  $T_x$  – соответственно средняя плотность ( $\text{кг/м}^3$ ), средняя газовая постоянная ( $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$ ) и средняя температура ( $\text{К}$ ) для летучих и смеси.

Средняя плотность  $\rho_x$  выразится

$$\rho_x = \frac{\rho_{\text{л}}u(1-m) + \rho_{\text{см}}vm}{u(1-m) + vm}. \quad (13)$$

Плотность смеси может быть найдена через концентрации  $C$  и  $C'$  летучих и воздуха в смеси





$$\rho_{см} = C + C'. \tag{14}$$

Причем из соотношения  $\frac{C}{\rho_l} + \frac{C'}{\rho_v} = 1$ , получим

$$C' = \left(1 - \frac{C}{\rho_l}\right) \rho_v. \tag{15}$$

Подставляя выражение (15) в уравнение (14), получим

$$\rho_{см} = C + \left(1 - \frac{C}{\rho_l}\right) \rho_v \tag{16}$$

Средняя газовая постоянная  $R_x$  равна

$$R_x = \frac{\rho_{см} R_{см} v m + \rho_l R_l u (1-m)}{\rho_{см} v m + \rho_l u (1-m)}, \tag{17}$$

а газовая постоянная смеси будет определяться концентрациями летучих и воздуха в смеси и их газовыми постоянными ( $R_l$  и  $R_v$ ). Поэтому

$$R_{см} = \frac{C}{\rho_{см}} R_l + \left(1 - \frac{C}{\rho_{см}}\right) \frac{\rho_v}{\rho_{см}} R_v. \tag{18}$$

Подставляя в уравнение (12) выражения (13) и (17), получим

$$p = \frac{\rho_l u (1-m) + \rho_{см} v m}{u(1-m) + v m} \cdot \frac{\rho_{см} R_{см} v m + \rho_l R_l u (1-m)}{\rho_{см} v m + \rho_l u (1-m)} T_x = \frac{\rho_{см} R_{см} v m + \rho_l R_l u (1-m)}{u(1-m) + v m} T_x. \tag{19}$$

С учетом уравнения (19) соотношение давлений в начальном сечении и на расстоянии  $x$  от него будет иметь вид

$$\frac{p}{p_0} = \frac{1}{\rho_0 R_0} \cdot \frac{T_x}{T_0} \cdot \frac{\rho_{см} R_{см} v m + \rho_l R_l u (1-m)}{u(1-m) + v m}. \tag{20}$$

Если принять  $T_x \approx T_0$  и учесть, что в конце смешения  $m \rightarrow 1$ , то для завершающей стадии процесса смешения уравнение (20) примет вид

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho_{см} R_{см}}{\rho_0 R_0}. \tag{21}$$

Если при движении газов в потоке принять скорость движения воздуха и летучих одинаковыми ( $v = u$ ) и постоянными, то уравнения (8) и (9) примут вид

$$\rho_l (1 - m_0) = \rho_l (1 - m) + C m, \tag{22}$$

$$\frac{u d(Cm)}{dx} = S q. \tag{23}$$

Из уравнения (22) будем иметь

$$C = \rho_l \left(1 - \frac{m_0}{m}\right). \tag{24}$$





Подставляя выражения (10), (11), (24) в уравнение (23) и разделяя переменные, получим

$$\frac{m}{1-m} dm = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\beta}{\left(1 + \frac{\beta\delta}{D}\right)u} m_0 dx. \tag{25}$$

Проинтегрируем левую часть выражения (25).

$$\int \frac{m}{1-m} dm = -m - \ln(1 - m) + C, \tag{26}$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

При  $m = m_0$  функция равна  $1 - m_0$ , поэтому  $C = 1 + \ln(1 - m_0)$ .

Отсюда

$$\ln \frac{(1-m_0)}{(1-m)} + 1 - m = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\beta}{\left(1 + \frac{\beta\delta}{D}\right)u} m_0 x. \tag{27}$$

Из уравнения (27) видно, что полное смешение ( $m \rightarrow 1$ ) теоретически наступает при  $x \rightarrow \infty$ . Однако практически можно считать наступление полного смешения при  $m = 0,99$ .

Суммарный коэффициент массообмена может быть найден следующим образом. Известно выражение [9]

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\alpha_m} + \frac{\delta}{D},$$

где величина  $1/\alpha_m$  представляет собой «сопротивление» турбулентного переноса, а величина  $\delta/D$  – «сопротивление» молекулярной диффузии. Так как величина  $\alpha_m \gg D/\delta$ , то из выражения (21) следует, что  $\beta = \frac{D}{\delta}$ . Известно, что процесс горения происходит в очень тонком слое, который отделяет продукты горения от горючей смеси. Зельдович Я.Б. вычислил толщину зоны горения для метана, которая оказалась равной  $6 \cdot 10^{-2}$  см. Если в указанном слое происходит горение, значит топливо и окислитель перемешаны и образуют горючую смесь. Поэтому примем  $\delta = 6 \cdot 10^{-2}$  см. Для системы  $\text{CH}_4$  – воздух коэффициент диффузии  $D$  в температурном интервале  $252 - 10^4$  К и при атмосферном давлении составляет  $0,186 \text{ см}^2/\text{с}$  [10]. Тогда  $\beta = 3,1 \text{ см}/\text{с}$ .

В работе [11] показано, порозность слоя кокса на колосниковой решетке составляет величину, равную  $0,51$ . Поэтому примем в сечении 0-0 порозность  $m_0 = 0,5$ .

Из уравнения (27) величина  $x_{\min}$ , определяющая начало смешивания летучих с воздухом, может быть найдена при  $m = m_0$

$$x_{\min} = \frac{\delta \left(1 + \frac{\beta\delta}{D}\right)u}{\beta}. \tag{28}$$

Для скорости  $u = 15 \text{ м}/\text{с}$   $x_{\min} = 0,58 \text{ м}$ . Получается, что тепломассобмен воздуха и летучих начинается на некотором расстоянии, зависящим в данном случае от скорости  $u$ , которая в паровозах может иметь и большие значения при больших форсировках котла.

Практически можно считать наступление полного смешения при  $m = 0,99$ . Расстояние  $x_{0,99}$ , при котором наступает практически полное смешение, может быть также определено из уравнения (27)

$$x_{0,99} = \frac{3,92\delta \left(1 + \frac{\beta\delta}{D}\right)u}{\beta m_0}. \tag{29}$$





### Заключение

1. Показано, что тепло-массобмен летучих с воздухом в топке паровоза начинается на некотором расстоянии от колосниковой решетки, зависящим, прежде всего, от скорости движения газов.
2. Отношение расстояния, на котором происходит полное смешивание летучих, к расстоянию, соответствующему началу их смешивания, есть величина постоянная, равная приблизительно 8.
3. Для более эффективного сжигания топлива в топке паровоза необходимо поднять температуру в нижней части топки паровоза путем создания по периметру последней теплоизолирующей стенки высотой 0,4 – 0,5 м.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сыромятников С. П. Тепловой процесс паровоза. Москва: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1940. 438 с.
2. Оленев Е.А. Метод определения температурного режима паровозной топки // Вестник машиностроения. 2011. № 10. С. 13–20.
3. Сокольский А. П., Тимофеева Ф.А. О скорости сгорания пыли // Исследование процессов горения натурального топлива: Сборник статей / Под общ. ред. проф. Г. Ф. Кнорре. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1948. С. 175–184.
4. Исследование процессов горения натурального топлива: Сборник статей / Под общ. ред. проф. Г. Ф. Кнорре. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1948. 297 с.
5. Жунко В. И., Лаженицын Ю.Б. Основы термической переработки топлива. Ленинград: Гостоптехиздате, 1954. 340 с.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Москва: Госэнергоиздат, 1949. 396 с.
7. Струнников М. Ф. Выход летучих из твердого топлива // Исследование процессов горения натурального топлива: Сборник статей / Под общ. ред. проф. Г. Ф. Кнорре. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1948. С. 103-109.
8. Канторович Б.В. О смешении газов, движущихся внутри цилиндрической трубы // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения: Труды института горючих ископаемых. Том XIX. Москва: Издательство АН СССР, 1962. 216 с.
9. Лавров Н.В., Шурыгин А.П. Введение в теорию горения и газификации топлива. Москва: Издательство АН СССР, 1962. 216 с.
10. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Михайлова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
11. Бернштейн Р.С. Теплоотдача в слое // Исследование процессов горения натурального топлива: Сборник статей / Под общ. ред. проф. Г. Ф. Кнорре. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1948. С. 88-97.

### REFERENCES

1. Syromyatnikov S. P. *Teplovoj process parovoza* [The thermal process of the locomotive]. Moscow: Gosudarstvennoe transportnoe zheleznodorozhnoe izdatel'stvo, 1940. 438 p.
2. Olenov E.A. *Metod opredeleniya temperaturnogo rezhima parovoznoj topki* [Method for determining the temperature regime of a locomotive furnace]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2011. No. 10, pp. 13–20.

3. Sokol'skij A. P., Timofeeva F.A. *O skorosti sgoraniya pyli*[On the rate of dust combustion]. Issledovanie processov goreniya natural'nogo topliva: Sbornik statej. Pod obshh. red. prof. G. F. Knorre. Moscow;Leningrad: Gosenergoizdat, 1948,p. 175–184.
4. *Issledovanie processov goreniya natural'nogo topliva: Sbornik statej*[Research of gorenje natural fuel combustion processes: Collection of articles]. Pod obshh. red. prof. G. F. Knorre. Moscow;Leningrad: Gosenergoizdat, 1948. 297 p.
5. Zhunko V. I., Lazhenicyn Yu.B. *Osnovy` termicheskoy pererabotki topliva* [Fundamentals of thermal fuel processing]. Leningrad: Gostoptexizdate, 1954. 340 p.
6. Mixeev M. A. *Osnovy` teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Gosenergoizdat, 1949. 396 p.
7. Strunnikov M. F. *Vyxod letuchix iz tverdogo topliva*[The release of volatiles from solid fuel]. Issledovanie processov goreniya natural'nogo topliva: Sbornik statej. Pod obshh. red. prof. G. F. Knorre. Moscow;Leningrad: Gosenergoizdat, 1948, p. 103-109.
8. Kantorovich B.V. *O smeshenii gazov, dvizhushhixsya vnutri cilindricheskoy trubuy`* [On mixing gases moving inside a cylindrical pipe]. Novy`e metody` szhiganiya topliv i voprosy` teorii goreniya: Trudy instituta goryuchix iskopaemyx. Tom XIX. Moscow: AN SSSR Publ., 1962. 216 p.
9. Lavrov N.V., Shury`gin A.P. *Vvedenie v teoriyu goreniya i gazifikacii topliva* [Introduction to the theory of gorenje and gasification of fuel]. Moscow: AN SSSR Publ., 1962. 216 p.
10. *Fizicheskie velichiny` : Spravochnik* [Physical quantities: Handbook]. A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovskij i dr.; Pod. red. I.S. Grigor`eva, E.Z. Mixajlova. Moscow; Energoatomizdat, 1991. 1232 p.
11. Bernshtejn R.S. *Teplootdacha v sloe*[Heat transfer in a layer]. Issledovanie processov goreniya natural'nogo topliva: Sbornik statej. Pod obshh. red. prof. G. F. Knorre. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1948, p. 88-97.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Оленев Евгений Александрович –доктор технических наук, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: [olenevea@mail.ru](mailto:olenevea@mail.ru))

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*OlenevEvgenyAlexandrovich*—Dr.Sci. (Eng.), Prof., Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai GrigoryevichStoletov, (600000, Russia, Vladimir, 87 Gorky Street, e-mail: [olenevea@mail.ru](mailto:olenevea@mail.ru))

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 04.06.2023, принята к публикации 25.06.2023.

The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 04.06.2023; accepted for publication 25.06.2023.