

21870

МИНИСТЕРСТВО РЕЧНОГО ФЛОТА СССР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Инж. В. В. МАСЛОВ

Др 29
ЧП

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СУДОВОЙ СКОРОСТНОЙ ТОПКЕ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель д. т. н.,
профессор ДЕШКИН В. Н.

Ленинград
1955

МИНИСТЕРСТВО РЕЧНОГО ФЛОТА СССР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Инж. В. В. МАСЛОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ
В СУДОВОЙ СКОРОСТНОЙ ТОПКЕ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель д. т. н.,
профессор ДЕШКИН В. Н.

Ленинград
1955

Экспериментальная часть работы
выполнена в ЦНИИРФе.



55-40441

ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ТЕКСТЕ

$C_{\text{кок}}, C_{\text{шл}}$	ккал/кг·град	— теплоемкость кокса и шлака;
$C_{\text{возд}}, C_{\text{CO}_2}, C_{\text{CO}}, C_{\text{N}_2}$	ккал/м ³ град	— теплоемкость воздуха, углекислоты, окиси углерода и азота;
$C_{\text{г}}$	ккал/м ³ град	— теплоемкость газа (суммарная);
ν	м ² /сек	— кинематическая вязкость;
$t_{\text{подг}}$	°С	— температура кокса на входе в слой;
$t_{\text{к}}$	°С	— температура в конце кислородной зоны;
t	°С	— текущее значение температуры в восстановительной зоне;
$T = t + 273$	°К	— то же — абсолютная температура;
$t_{\text{возд}}$	°С	— температура дутьевого воздуха;
P	кг/м ²	— давление в газовой среде, в слое;
$R = 848$	кг/моль·град	— газовая постоянная;
$B_{\text{кок}}^{\text{сл}}$	кг/час	— количество кокса, поступающего в слой;
$B_{\text{общ}}$	кг/час	— количество топлива, загружаемого в топку;
L	м ³ /час	— количество воздуха, подаваемого в слой;
$Q_{\text{охл}}^{\text{к. з.}}, Q_{\text{охл}}^{\text{в. з.}}, Q_{\text{охл}}^{\text{общ.}}$	ккал/час	— тепло, отнимаемое от слоя в кислородной зоне, в восстановительной зоне и суммарное для слоя;
$R_{\text{з. р.}}$	м ²	— площадь зеркала горения;
P	м	— периметр камеры горения топки;
$A_{\text{к}}$	%	— зольность сухой массы топлива;
χ		— отношение количества кокса, сгорающего в кислородной зоне, к количеству кокса, поступающего в слой;
\bar{U}	м/м ²	— периметр углеродных каналов в слое;
$m_0, m_{\text{в}}, m$	м ² /м ²	— порозность слоя: начальная, начальная в восстановительной зоне, текущая в восстановительной зоне;
δ_0, δ	м	— размеры углеродных частиц: начальный, текущий в восстановительной зоне;

a, y, a_k		— концентрация CO_2 на входе в восстановительную зону, текущая в восстановительной зоне, конечная в восстановительной зоне (в долях единицы);
W_B, W_T	м/сек	— скорость газа на входе в восстановительную зону и текущая в восстановительной зоне;
x		— количество углерода, сгорающего в CO в кислородной зоне;
H	м	— высота слоя;
r	ккал/кг	— теплота плавления шлака.

Введение

В настоящее время перед водным транспортом нашей Родины стоят новые ответственные задачи в деле дальнейшего увеличения грузооборота и снижения себестоимости перевозок. Существенную роль в этом вопросе должно сыграть внедрение на речном флоте новой техники, автоматизации и механизации основных процессов.

В области паросиловой техники к числу процессов, подлежащих механизации, в первую очередь следует отнести процесс топливосжигания, механизация которого должна способствовать повышению эксплуатационных показателей паросиловых установок, широкому внедрению автоматики на судах речного флота, уничтожению тяжелого физического труда кочегара.

В настоящее время на речном флоте широко развернулись работы по механизации топливосжигания в направлении приспособления к специфичным условиям флота промышленных образцов механических слоевых топок (топок с шурующей планкой и топок ПМЗ).

Не останавливаясь подробно на сравнении большей или меньшей эффективности того или иного типа механизации слоевого процесса сжигания топлива, следует отметить, что современный способ его организации в виде слоя топлива, свободно залегающего на колосниковой решетке, не может быть признан принципиально совершенным. Этот способ не позволяет осуществить высокие тепловые напряжения зеркала горения вследствие перехода слоя через предел аэродинамической устойчивости при повышении скорости дутья. Вместе с тем, многочисленные исследования, проведенные советскими учеными в области изучения процесса горения топлива в слое, показали, что ведущей стадией процесса является горение коксового остатка и что в условиях промышленного сжигания твердого топлива горение кокса и его газификация определяется, в основном, не

кинетикой химических реакций, а процессом диффузии окислителя к поверхности углерода. При росте скоростей продувания слоя соответственно растут коэффициенты диффузии, увеличивается общая скорость горения, повышаются температуры в слое.

Таким образом, интенсификация слоевого процесса горения топлива может идти только путем увеличения подачи воздуха в слой при одновременном преодолении аэродинамической неустойчивости мелких фракций, т. е. по пути создания так называемого скоростного процесса.

Состояние вопроса

Принципы организации скоростного процесса в слое были впервые предложены инж. В. В. Померанцевым в 1936 г. Сущность скоростного процесса сводится к следующему.

Слой топлива продувается воздухом с большими скоростями, интенсивный подвод воздуха сочетается с перекрытием выходного сечения слоя так называемой зажимающей решеткой. На решетке создаются динамические своды топлива, разрушающиеся по мере выгорания и возникающие затем вновь. При этом вынос топлива из слоя, даже при наличии мелких фракций и высоких скоростей воздуха, становится столь незначительным, что позволяет осуществить напряжения зеркала горения таких топков равными $7 \div 8$ млн ккал/м² час без сколько-нибудь значительного снижения экономичности.

В целях обеспечения высоких тепловых напряжений в слое, конструкция скоростных топков предусматривает также интенсификацию подготовки топлива путем розжига его в специальной шахте, через которую навстречу сходящему вниз топливу просасываются горячие газы из слоя. Благодаря этому топливо подсушивается, летучие возгоняются и в слой поступает кокс с температурой 990°—1100°С.

Удаление шлака и золы из слоя производится путем организации специальной системы сухого или жидкого шлакоудаления в зависимости от рода топлива.

За последние годы топки скоростного горения для древесины и торфа получили широкое распространение в промышленности. В настоящее время в эксплуатации находится свыше 50 топков, установленных под котлами производительностью от 2 до 120 тонн.

Однако, если создание скоростной топки для древесины и торфа было осуществлено сравнительно легко, то организация

скоростного процесса на каменном угле встретила ряд трудностей.

Первые попытки организации скоростного процесса в зажатом слое на каменных углях относятся к 1939 г., когда в ЦКТИ был создан специальный стенд. Исследования, проведенные на стенде, указали на невозможность организовать процесс в слое с сухим шлакоудалением, поэтому дальнейшее исследование было направлено по пути организации процесса с жидким шлакоудалением. В этих целях, начиная с 1943 г. по 1948 г., ЦКТИ была испытана серия малых стендов, где удалось в ряде случаев добиться высоких форсировок слоя и режимов, близких к бесшлаковочному. В этом случае процесс в топке был организован следующим образом: топливо загружалось в бункер и сходило вниз по специальной шахте подготовки, свободно рассыпаясь на зажимающей решетке. Воздух подавался к плоскости свободного рассыпания слоя и продувал слой сверху вниз. Часть воздуха и топочных газов просасывалась через шахту подготовки навстречу сходящему топливу, подсушивая и розжигая его.

В 1948—49 гг. в ЛПИ был построен полупромышленный стенд, на котором, наряду с наладкой процесса горения, производилась уже отработка отдельных конструктивных узлов топки. Испытания стенда проводились на антраците.

В 1949 г. ЦНИИРФом совместно с ЦКТИ была построена первая судовая топка скоростного горения для антрацита (п/х «1 Мая» СЗРП). Испытания топки проводились в 1950—52 гг. в ЦНИИРФе при участии автора данной работы. Испытания позволили накопить значительный экспериментальный материал, позволили отработать отдельные конструктивные элементы топки и дали возможность наметить практические пути решения основного вопроса — организации незатухающего процесса в слое.

Таким образом, в течение 1943—52 гг. было проведено свыше 120 опытов и было испытано больше чем 25 различных вариантов топков.

Вместе с тем, поскольку и в последних опытах на топке п/х «1 Мая» не удалось достичь полностью бесшлаковочного процесса, а конструкция ее не допускала возможности осуществить коренные переделки без значительных затрат, было решено отказаться от дальнейших экспериментов на ней, произвести теоретический анализ процесса с учетом накопленных экспериментальных данных, а затем полученные решения проверить на специальном стенде.

Аналитическое определение влияния высоты слоя и его теплопотерь на стационарность скоростного процесса

Ход экспериментального исследования топок скоростного горения на каменном угле показал, что основной причиной, нарушившей стационарность процесса горения, было шлакование слоя, которое являлось следствием либо местного, либо общего низкого уровня температур в районе зажимающей решетки.

Общее снижение температурного уровня в слое у зажимающей решетки могло возникнуть либо вследствие значительной высоты слоя и охлаждения слоя восстановительными реакциями, либо малой высоты слоя, когда не успевает полностью поглотиться кислород, а также вследствие значительных тепловых потерь слоя через ограничивающие его поверхности, недостаточно интенсивного розжига топлива и недостаточно интенсивного процесса горения в целом.

Местное снижение температур являлось следствием неравномерности тепловой работы слоя по сечению решетки, основными причинами которой следует считать неравномерную высоту слоя, неравномерное заполнение слоя различными фракциями, местные прогары слоя, сильное местное охлаждение слоя ограничивающими поверхностями.

Таким образом, к главным определяющим факторам, связанным с организацией процесса в слое, относятся:

- высота слоя;
- размеры теплопотерь слоя, определяемые форсировкой процесса и конструкцией охлаждающих поверхностей;
- равномерность воздухопроницаемости слоя, определяемая постоянством высоты слоя и характером распределения фракций по площади решетки, а также отсутствием местных прогаров.

Из указанных выше трех основных вопросов только два из них — влияние оптимальных высот слоя и влияние теплопотерь слоя на температурный уровень в его конце — могут быть исследованы теоретическим путем.

Вопрос о равномерной воздухопроницаемости слоя и возможных в этом случае отклонениях может решаться только в условиях эксперимента, так как теоретическое решение его громоздко и носит вдобавок сугубо приближенный характер.

Основной задачей теоретического анализа являлось определение высоты слоя топлива, допускающего жидкое шлакоудаление в зависимости от характера газообразования и тепловых потерь в его кислородной и восстановительной зонах.

В целях определения температурного уровня в слое, допускающего жидкое шлакоудаление, были использованы литературные данные по жидкому шлакоудалению в топках стационарных котлов, что дало возможность принять этот уровень равным 1500°C . Это обстоятельство позволило значительно упростить расчеты, так как в рассматриваемом случае восстановительная зона располагалась в диффузионной области протекания реакций.

Для оценки явлений, происходящих в горящем слое, использовались уравнения теплового и материального баланса кислородной и восстановительной зон слоя. При этом высота кислородной зоны слоя согласно данным опытов ВТИ (Колодцев Х. И.) считалась постоянной и равной трем начальным размерам куска топлива. Для нее определялись только температуры в слое и состав газа на выходе, для чего использовались следующие уравнения: *

а) Уравнение В. В. Померанцева для теплового баланса зоны, отнесенное к 1 кг кокса, сгорающего в ней:

$$C_k t_{\text{подг}} \frac{1}{x} + C_{\text{шл}} t_{\text{подг}} \frac{A_k}{1 - A_k} \frac{1}{x} + 8,97 (1 - 0,5x) C_{\text{возд}} t_{\text{возд}} + \\ + 8137 - 5685x = C_k t_k \frac{1-x}{x} + \left\{ 1,87 [C_{\text{CO}_2} - (C_{\text{CO}_2} - C_{\text{CO}})x] + \right. \\ \left. + C_{\text{N}_2} (7,04 - 3,52x) \right\} t_k + \frac{Q_{\text{охл.}}^{\text{к. з.}}}{B_{\text{кок}}^{\text{сл.}} x} + \frac{A_k}{(1 - A_k)} (C_{\text{шл}} \cdot t_k + r)$$

б) Уравнение Х. И. Колодцева для газообразования в кислородной зоне:

$$\frac{1-x}{x} \equiv 82 e^{\frac{-8500}{t_k + 273}}$$

в) Частные уравнения материального баланса: выход CO и CO₂ из кислородной зоны в долях единицы

$$\text{CO} = \frac{1,87x}{8,91 - 3,52x}; \quad \text{CO}_2 = a_k = \frac{1,87(1-x)}{8,91 - 3,52x}$$

Высота восстановительной зоны определялась путем решения составленной нами системы уравнений.

*) Обозначения, принятые в формулах, см. первую страницу.

Выводу основных уравнений системы предшествовало принятие схемы выгорания слоя. За рабочую была выбрана схема, по которой слой образовывался из горизонтальных рядов шарообразных частиц.

Размер частиц по мере перехода к нижерасположенным рядам уменьшался от δ_0 до 0. Частицы по мере выгорания опускались вниз, садясь друг на друга. Число частиц в каждом горизонтальном сечении было постоянным.

Система уравнений включала в себя следующие зависимости:

а) Уравнение изменения порозности слоя по мере выгорания частиц:

$$\frac{1-m}{1-m_0} = \left(\frac{\delta}{\delta_0}\right)^2$$

б) Уравнение изменения периметра условного канала в слое по мере выгорания частиц:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{\delta}{\delta_0}$$

в) Уравнение материального баланса восстановительной зоны:

$$\frac{1+a}{a} \left(\frac{W_B \cdot a \cdot m_B \cdot p}{RT_K} \right) d \left(\frac{y}{1+y} \right) = -K_K \cdot y \cdot \frac{p}{RT} U dH$$

г) Уравнение теплового баланса восстановительной зоны:

$$\frac{(C_r - 0,54 C_k) t_k + \left[1730 + \frac{Q_{охл}^{в.з.}}{B_{кок}^{сл} (1-x)} \right]}{(C_r - 0,54 C_k) t + \left[1730 + \frac{Q_{охл}^{в.з.}}{B_{кок}^{сл} (1-x)} \right]} =$$

$$= \frac{C_1 + \frac{1+a}{1+y} (C_r - 0,54 C_k)}{C_1 + (C_r - 0,54 C_k)}$$

здесь:

$$C_1 = \left[\frac{(1-x)(1-A_k) + A_k}{x(8,91 - 3,52)x(1-A_k)} + 0,54 \right] C_k$$

д) Уравнение скорости газового потока в восстановительной зоне:

$$\frac{W_r}{W_B} = \frac{1+a}{1+y} \cdot \frac{T}{T_K} \cdot \frac{m_B}{m}$$

е) Уравнение диффузионного обмена в восстановительной зоне:

$$Nu_{диф} = 0,05 Re$$

ж) Уравнение выгорания частиц в восстановительной зоне (при полном восстановлении):

$$\frac{1+a}{a} \cdot \frac{y}{1+y} = \left(\frac{\delta}{\delta_B}\right)^3$$

при неполном восстановлении:

$$\frac{1+a_k}{a-a_k} (1+a) \left[\frac{y}{1+y} - \frac{a_k}{1+a_k} \right] = \left(\frac{\delta}{\delta_B}\right)^3$$

Совместное решение этих уравнений дало возможность получить зависимость относительной высоты восстановительной зоны от изменения концентрации CO_2 :

$$\frac{1}{z^{1/3}} (1-m_0) (1-x_{пред})^{2/3} z^{1/3} - (1-m_0) (1-x_{пред})^{2/3} - \bar{I} = 0,072 (1-x_{пред})^{1/3} \frac{H_{вз}}{\delta_0}$$

здесь:

$$z = \frac{y(1+a)}{a(1+y)}; \quad x_{пред} = \frac{1}{2-x};$$

для случая полного восстановления и

$$-\frac{k}{2} \ln \frac{(1+\sqrt[3]{B})^2}{(1-\sqrt[3]{B} + \sqrt[3]{B^2})} + k' \sqrt[3]{3} \left[\arctg \frac{1}{\sqrt[3]{3}} + \arctg \frac{2-\sqrt[3]{B}}{\sqrt[3]{3}\sqrt[3]{B}} \right] - 1,57 (1-x)^{2/3} = 0,215 (1-x)^{1/3} \frac{H_{вз}}{\delta_0}$$

здесь:

$$B = (1+a) \frac{a_k}{1-\frac{a_k}{a}}; \quad k = \frac{1}{3} - 0,523 (1-x)^{2/3} \sqrt[3]{B}$$

$$k' = \frac{1}{3} + 0,523 (1-x)^{2/3} \sqrt[3]{B}$$

для случая неполного восстановления.

В целях удобства расчетов была построена номограмма, дававшая возможность определить высоту слоя по требуемому температурному уровню в конце слоя и ожидаемому значению теплопотерь.

Анализ результатов расчетов позволил сделать следующие выводы:

1. Температуры в конце слоя в значительной степени определяются высотой слоя, величиной относительной теплопотери, температурой подогрева воздуха и температурой топлива на входе в слой. При росте высоты слоя, его относительной теплопотери и уменьшении температур топлива и воздуха на входе в слой, температуры в конце слоя падают.

2. При отсутствии подогрева воздуха в слое полного восстановления невозможно достичь температуры вблизи зажимающей решетки, равной 1500°C , даже при полном отсутствии теплопотерь.

3. Высота слоя топлива, допускающая жидкое шлакоудаление по температурным условиям, находится в обратной зависимости с тепловыми потерями слоя. При росте теплопотерь высота слоя должна уменьшаться.

4. В условиях промышленных скоростных угольных топок при существующем уровне теплопотерь высота слоя должна лишь немного превышать размеры кислородной зоны. В случае уменьшения этих теплопотерь примерно вдвое можно добиться увеличения высоты слоя до размеров, равных $(12 \div 13) \delta_0$ и тем самым несколько повысить равномерность процесса по площади решетки.

5. В целях всемерного снижения относительных теплопотерь необходимо стремиться к максимально возможному повышению тепловой нагрузки топки.

Экспериментальное исследование вопроса

Для проверки указанных выше положений в 1953 г. в ЦНИИРФе был создан опытный полупромышленный стенд, имевший следующие принципиальные отличия от всех предыдущих опытных топок:

1. Слой топлива на зажимающей решетке имел малую высоту.

2. Высота слоя была равномерной по площади решетки.

3. Допускалось ручное вмешательство в процесс.

На стенде было проведено 12 опытов, из которых первые пять были наладочными, а в последующих шести исследовался

ТАБЛИЦА ОПЫТОВ НА СТЕНДЕ 1953 г.

Наименование	Обозначение	Размеры	№ № ОПЫТОВ								
			9 ₁	9 ₂	10	11 ₁	11 ₂	11 ₃	12		
Общее время работы топки	τ	час	10	5,5	11,6	29					
Длительность режима	τ'	час	4,17	1,835	2	4,08	1,6	1,835	22		
Топливо	A_p	%	Антрацит рядовой								
Зольность	W_p	%	9,78								
Влажность	Q_p^H	%	5,79								
Калорийность	B'	ккал/кг	6800								
Сожжено всего топлива	B	кг	1264	870	1330						
Часовой расход топлива за опыт	$B_{з.р.}$	кг/час	167	78	173	110	115				
Площадь решетки	$R_{з.р.}$	м ²	0,165								
Весовое напряжение решетки	$\frac{B}{R_{з.р.}}$	кг/м ² час	1010	474	1030	1050	666	696	910		
Тепловое напряжение решетки	$\frac{BQ_p^H}{R_{з.р.}}$	млн ккал/м ² час	6,9	3,2	7,0	7,14	4,57	4,8	6,22		
Высота слоя	$H_{сл}$	мм	250	200	340						
Сопротивление слоя	$\Delta P_{сл}$	мм в. ст.	105	45	100	165	80	250	160		
Газовый анализ за топкой	CO_2	%	17,0	18,2	16,1	17,7	19,5	16,4	16,05		
	O_2	%	2,5	1,9	3,4	0,5	1,1	4,0	3,45		
	CO	%	1,66	0,5	1,66	3,64	1,32	0	2,48		
	α	—	1,085	1,085	1,14	0,94	1,025	1,235	1,12		

процесс горения в слое. Заключительный опыт, продолжительностью свыше суток, был организован в целях проверки результатов исследования в течение достаточно длительного промежутка времени.

Основным практическим результатом проведенных исследований следует считать получение стационарного процесса с жидким шлакоудалением при высоких тепловых напряжениях зеркала горения (до 7 млн ккал/м² час) и относительно малых сопротивлений слоя (100—160 мм в. ст.). (См. таблицу).

Исследование, проведенное на стенде, а также данные испытаний 1948—52 гг. позволили установить ряд закономерностей, касающихся организации процесса горения в слое скоростной топki. Основные результаты исследования приводятся ниже.

а) Влияние высоты слоя на характер газообразования в кислородной и восстановительной зонах

Слоевой и подслоный газовый анализ, сделанный в опытах на стенде в 1953 г., а также замеры температур в слое показали, что даже при наличии равномерной высоты слоя топлива имеет место резкая неравномерность процесса в центральной его части и узком периферийном кольце, примыкающем к боковым поверхностям, ограничивающим камеру горения.

Исследование процесса в центральной части слоя показало, что по мере увеличения высоты слоя и удаления конца кислородной зоны от зажимающей решетки, интенсивно поглощающей тепло, температуры конца кислородной зоны растут, а высота ее уменьшается. Все это сопровождается некоторым увеличением выхода CO₂ из кислородной зоны при одновременном уменьшении концентрации CO за счет частичного догорания последнего в межкусковых каналах. Как показали опытные данные, в условиях, имевших место на стенде, газообразование в кислородной зоне реального скоростного слоя подчинялось зависимости

$$\frac{CO}{CO_2} = 4,57 \cdot 10^{-3} e^{\frac{9000}{t_k + 213}}$$

не совпадавшей с зависимостью, предложенной Х. И. Колодцевым. Общая длина кислородной и восстановительной зон в опытах на стенде несколько превышала те же значения, полученные в лабораторных установках Х. И. Колодцевым. Причиной этого является повышенная порозность верхней и нижней частей реального слоя стенда.

Кроме того, высота кислородной зоны в опытах на стенде зависела не только от начальных размеров куска топлива, но и от температур в конце зоны. При изменении t в пределах (1100—1800)°C высота кислородной зоны изменялась в пределах $(8 \div 4) \delta_0$.

Следует также отметить, что расчетные значения высоты восстановительной зоны занимают некоторое среднее положение между опытами Х. И. Колодцева и опытами на стенде. Так, например, если выведенную нами зависимость высоты восстановительной зоны от уровня восстановления $\frac{a_k}{a}$ представить в виде

$$\frac{H_{вз}}{\delta_0} = f_2 \left(\frac{a_k}{a} \right),$$

та же зависимость для опытов стенда будет $\frac{H_{вз}}{\delta_0} = 1,76 f_2 \left(\frac{a_k}{a} \right)$, а для опытов Х. И. Колодцева $\frac{H_{вз}}{\delta_0} = 0,56 f_2 \left(\frac{a_k}{a} \right)$. Иначе говоря, вид этой зависимости будет определяться гидродинамической обстановкой в слое, в частности его порозностью.

Повышенная порозность слоя и повышенный выход CO₂ из кислородной зоны слоя оказывали благоприятное влияние на температуры в конце слоя, так как увеличение выхода CO₂ в кислородной зоне способствовало общему росту температур в слое, а повышенная порозность нижней части слоя и не очень интенсивный ход реакций восстановления давал возможность получить довольно высокие температуры в конце слоя при его общей сравнительно большой высоте (до 11 δ_0).

Несмотря на то, что увеличение высоты слоя сопровождалось некоторым ростом абсолютных и относительных теплопотерь, этот прирост компенсировался теплоприходом от догорания CO в кислородной зоне слоя. Таким образом, при повышении высоты слоя от 6 δ_0 до 11 δ_0 интенсивного падения температур в конце слоя не наблюдалось. В общем температуры у решетки в опытах на стенде колебались в пределах 1100—1700°C.

Анализ опытов на других стендах показывает, что при дальнейшем увеличении высоты слоя от 12 δ_0 до 40 δ_0 наблюдается интенсивное падение температуры в конце слоя, вызываемое развитием восстановительных реакций.

Исследование процесса в периферийном кольце, примыкающем к боковым поверхностям топki, показало, что горение здесь протекает в кинетической области, о чем свидетельствуют низкие температуры и высокие коэффициенты избытка воздуха. При-

чиной этого являются повышенная воздухопроницаемость краев, вследствие их большой порозности, а также охлаждение слоя боковыми экранными поверхностями.

В целях всемерного устранения подобного краевого эффекта опыты на стенде 1953 г. проходили при непрерывном подсыпании разожженного топлива на края слоя, что способствовало снижению коэффициентов избытка воздуха и приводило к росту температур до уровня центральной части слоя. Тем самым устранялись очаги шлакования, зарождавшиеся обычно по краям слоя.

Необходимо отметить, что общее увеличение высоты слоя также сказывалось благоприятно на равномерности выдачи газа по площади решетки и приводило к уменьшению избытка воздуха по краям слоя.

Сравнение между собою опытов на стендах 1948—53 гг. дало возможность установить, что содержание кислорода под решеткой стенда 1953 г., при прочих равных условиях, в 1,5—1,6 раза меньше, чем в опытах на всех других стендах. Это свидетельствовало о наличии в слое стенда 1953 г. значительно более высоких температур, что и обеспечивало его бесшлаковочную работу.

Ход опытов показал, что в слое малой высоты ($6,0 \delta_0$), даже при наличии высоких тепловых нагрузок, наблюдался общий низкий уровень температур вследствие значительного охлаждения слоя ограничивающими его экранными поверхностями и в связи с высокими избытками воздуха, что приводило к некоторому шлакованию, особенно по краям слоя. При высоте слоя $8 \delta_0$ шлакование решетки полностью отсутствовало на высоких нагрузках и начиналось только при переходе к пониженным нагрузкам. При увеличении высоты слоя до $11 \delta_0$ шлакование начиналось вновь даже при высоких нагрузках, несмотря на достаточно высокий температурный ход процесса. В данном случае можно предполагать, что решающее влияние на шлакование слоя оказывал восстановительный характер среды, приводивший к перерождению железистых включений в шлаке и к повышению температуры их плавления.

б) Тепловые потери слоя и пути их снижения

Второй основной задачей исследования являлось определение уровня теплотерь, допускающего беспрепятственный выход жидкого шлака при наличии оптимальной высоты слоя.

Для определения требуемого минимального уровня тепло-

потерь на стенде была проведена серия опытов на оптимальных высотах слоя, равных $8 \delta_0$, при различных тепловых нагрузках. Эти испытания показали, что шлакование топки начинается в случае, когда значения относительной теплотери превышают величину

$$\frac{Q_{\text{охл}}^{\text{общ}}}{B_{\text{общ}}} = 900 \div 950 \text{ ккал/кг}$$

Установление численного значения предельного уровня теплотери дало возможность определить требуемые тепловые нагрузки топок, оценить испытанные конструкции экранных поверхностей и зажимающих решеток и наметить некоторые мероприятия, способствующие общему снижению теплотери слоя.

Определение тепловых нагрузок топок, требуемых по условию обеспечения жидкого шлакоудаления, проводилось на основании данных испытаний различных стендов в 1949—53 гг. Обобщение этих данных в безразмерной зависимости

$$\frac{Q_{\text{охл}}^{\text{общ}}}{B_{\text{общ}} Q_p^{\text{н}}} = f(Re \text{ топки}), \text{ где } Re \text{ топки} = \frac{L(273 + t_{\text{возд}})}{360 \cdot 273 \cdot R_{3,p}} \cdot \frac{4 R_{3,p}}{P}$$

и сопоставление их с приведенным выше предельным уровнем теплотери дало возможность установить предельные значения $Re \text{ топки} = (50 \div 60) \times 10^3$.

Используя эти данные, можно легко установить требуемый уровень тепловой нагрузки слоя в установках различных размеров. Анализ этих данных показывает, что с увеличением размеров установок минимальные форсировки топок, требуемые по условию жидкого шлакоудаления, падают.

В целях выбора рациональной конструкции охлаждающих поверхностей, допускающих минимальные теплотери, было проведено сравнение трех типов змеевиков, ограничивающих камеры сгорания скоростной топки, и свыше 20 различных типов зажимающих решеток.

Сравнение тепловых и конструктивных показателей боковых экранных змеевиков позволило установить, что наилучшей конструкцией является змеевик, выполненный из ошпированной трубы с шагом $\frac{S}{d} = 2$, обмурованный термобетоном (стенд 1953 г.). Значение относительной теплотери $\frac{Q_{\text{эм}}}{B_{\text{общ}}}$ в такой змеевик было наименьшим и равнялось 200 ккал/кг, а тепло-

восприятие 1 м^2 поверхности камеры сгорания равнялось $(40 \div 60) 10^2 \text{ ккал/м}^2$.

Сравнение различных типов зажимающих решеток показало, что наиболее надежными являются решетки из голых труб с приваренными к ним шипами.

Всякого рода футеровки решетки шамотом, чугуном, фарфором и хромитом оказались совершенно нестойкими по отношению к агрессивному действию жидкого шлака и к высоким температурам в слое.

Наиболее перспективными из голых шипованных решеток являются решетки, выполненные из труб малого диаметра ($d_{\text{нар}} = 14 \div 16 \text{ мм}$) с малым отношением поверхности шипов к поверхности труб, равным $0,04-0,14$. Относительная теплопотеря в такие решетки была в $3 \div 4$ раза меньше, чем у всех прочих типов.

В данном случае, как и ранее, удалось установить безразмерную зависимость относительной теплопотери в решетку от величины Re топки, что дало возможность в дальнейшем определить ожидаемые теплопотери в решетку в зависимости от размеров топок и их нагрузок по воздуху. При Re топки $= (50 \div 60) \times 10^3$ относительная теплопотеря в решетку не должна превышать величин $\frac{Q_{\text{реш}}}{B_{\text{обш}} Q_p} = 0,05$.

На основании результатов испытаний удалось определить, что коэффициенты теплоотдачи от слоя к трубам зажимающей решетки достигают величины $(130 \div 160) \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$. Это, в свою очередь, дало возможность рассчитать вариант решетки, охлаждаемой паром. Расчет показал, что охлаждение паром позволит сократить теплопотерю в решетку примерно на 40% как за счет уменьшения температурного напора, так и за счет уменьшения коэффициентов теплоотдачи от стенки к пару по сравнению с водой.

в) Неравномерность воздухопроницания слоя и ее влияние на характер процесса

Третьим фактором, оказывающим существенное влияние на характер процесса в слое, является равномерность воздухопроницания слоя при его равномерной высоте.

Так, на топке скоростного горения п/х «1 Мая» отношение высоты слоя в центральной ее части к высоте слоя по краям колебалось от 1,25 до 2,95.

При столь высокой неравномерности высоты слоя, горение в топке протекало лишь по краям слоя. Его середина почти не продувалась воздухом. Указанная картина усугублялась также естественной рассевкой рядового топлива, выходящего из зоны подготовки. При этом на края слоя скатывались крупные куски топлива, а в середине скапливалась мелочь. В результате, вследствие повышенной форсировки краев, на некотором расстоянии от боковых поверхностей развивались высокие температуры и наблюдался интенсивный выход жидкого шлака. В дальнейшем, по мере прогорания слоя, порозность краев увеличивалась, образовывались местные прогары, увеличивался проскок кислорода через слой, понижались температуры, началось шлакование, перемещавшееся постепенно от края к центру топки. Процесс горения в топке расстраивался, а сопротивление слоя росло.

Приведенная картина процесса полностью подтверждается всем ходом опытов на топке п/х «1 Мая»; характером шлаковых ванн в слое, разрушением керамических покрытий решеток и, наконец, расчетами температур в слое по методике, приведенной выше.

Переход на стенде 1953 г. к слою равномерной высоты, при одновременном его разравнивании, резко изменил картину процесса и создал требуемую равномерность воздухопроницания слоя. При этом избыток воздуха под слоем значительно сократился и был близок к $\alpha = 1$ даже при высоте слоя, равной $6,0 \text{ в}$.

В целях устранения ручного вмешательства в работу слоя по засыпанию образующихся прогаров и поддержанию равномерной высоты слоя, по всей его площади шахта розжига топлива в последующей серии опытов осенью 1954 г. была поставлена эксцентрично камере сгорания и ей было придано вращение со скоростью $1 \div 0,5 \text{ об/мин}$.

В настоящее время с вращающейся шахтой проведены первые опыты, давшие положительные результаты.

г) Подготовка топлива и ее роль в общей организации процесса в скоростной топке

В условиях скоростной угольной топки, где осуществлена схема попутного движения топлива и воздуха, организация подготовки по принципу неограниченного зажигания в самом слое оказалась невозможной. Поэтому возникла необходимость создания над горящим слоем специальной шахты, где навстречу

спускающемуся топливу просасываются горячие топочные газы, подсушивающие и разжигающие это топливо.

Кроме того, часть топлива, сходящего вниз по шахте розжига, была задержана на специальных колосниках, что дало возможность образовать постоянные очаги горения и добиться устойчивого розжига топлива.

Ход опытов на скоростной топке показал, что для обеспечения устойчивого процесса в скоростном слое, температура разожженного топлива, поступающего в слой, должна быть равной $1000 \div 1100^\circ\text{C}$. В этом случае наблюдается значительная интенсификация горения в слое. При температурах розжига, равных $800\text{--}850^\circ\text{C}$, процесс в слое на холодном дутье получается затухающим.

Соответствующие измерения показали также, что в зоне подготовки протекают процессы глубокой газификации топлива и в газе, выходящем из зоны подготовки, присутствует значительное количество СО и иногда даже H_2 .

Опыты 1953 г. дали возможность оценить расход топлива в зоне подготовки. Для обеспечения указанных выше температур розжига требовалось в зоне подготовки сжигать от 15 до 20% топлива, подаваемого в топку.

д) Некоторые аэродинамические показатели горящего слоя

Опыты на стенде 1953 г. не ставили каких-либо специальных задач по изучению аэродинамики горящего слоя. Однако ряд измерений позволил сделать некоторые выводы по данному вопросу.

Еще опыты на топке п/х «1 Мая» дали возможность установить, что сопротивление горящего слоя в несколько раз превышает сопротивление холодного слоя, а измерения сопротивления по высоте слоя, произведенные на стенде 1953 г., а также на стенде 1949 г., показали, что основная доля сопротивления горящего слоя падает на ту его часть, которая находится в конце кислородной и начале восстановительной зон.

Это обстоятельство является следствием растрескивания топлива, а также значительного увеличения скоростей газа вследствие наличия в этом районе наиболее высоких температур. Верхняя часть слоя и нижняя его часть, примыкающая к зажимающей решетке, имеют высокую порозность и, следовательно, оказывают незначительное сопротивление движению газов.

Обработка опытов в безразмерных координатах $\lambda = f(Re_{сл})$, где λ — коэффициент сопротивления слоя, а $Re_{сл}$ — критерий Рейнольдса, где определяющими являются начальный размер куска топлива и скорость воздуха во входном сечении слоя, показала, что в горящем слое имеет место значительное падение коэффициента сопротивления при увеличении $Re_{сл}$, что свидетельствует о наличии интенсивного выгорания слоя и увеличения его порозности при повышении форсировки. Это падение настолько велико, что при некоторых значениях $Re_{сл}$ коэффициент сопротивления горящего слоя становится равным коэффициенту сопротивления холодного слоя.

Аналитический вид этой зависимости с достаточной степенью точности может быть представлен как

$$\lg \lambda = \frac{K}{[\lg Re]^{2,7}} \quad \text{где } K = 40 \div 60$$

Сказанное выше дает основание сделать вывод, что для получения наивыгоднейших сопротивлений в слое необходимо всемерно увеличивать его форсировку и стремиться к максимальному снижению высоты.

Тепловые и экономические показатели топки скоростного горения на антраците

Испытания различных стендов топки скоростного горения позволили установить, что для достижения высоких форсировок зажато го слоя не требуется каких-либо специальных мероприятий. Так, например, в полупромышленной установке стенда 1953 г. были достигнуты тепловые нагрузки в 7 млн ккал/м² час, при этом на зажимающей решетке площадью 0,165 м² сжигалось до 115 кг кокса в час.

Исходя из приводившихся ранее данных о допустимом уровне тепловых потерь, можно считать, что тепловые нагрузки в слое промышленных судовых топок будут лежать в пределах $4 \div 5$ млн ккал/м² час, что не представляет каких-либо трудностей в осуществлении. Следует также отметить, что опыты на различных установках указали на высокие маневренные качества скоростных топок и на высокую равномерность процесса тепловыделения, весьма близкого в этом смысле к факельному процессу.

В опытах 1948—1953 гг., наряду с прочими показателями, исследовалась также экономичность топки.

Потеря с химическим недожогом, несмотря на наличие значительных количеств СО под решеткой, была легко доведена до нуля с помощью добавки воздуха под слой через обычные гляделки.

Потеря во внешнюю среду на стендах топки складывалась из потери с радиацией верхней плоскости слоя 1,6—3%, потери через обмуровку $0,5 \div 0,7\%$, потери в охлаждающие поверхности змеевика и решетки 10—12%.

В условиях промышленной топки, работающей под давлением дутьевого воздуха, потеря с радиацией будет близка к нулю, а потери в поверхности, охлаждаемые водой, легко могут быть превращены в полезное тепло котельной установки.

Потеря с провалом. В длительном опыте на стенде 1953 г. эта потеря была равной 9,8%, а в опытах с вращающейся шахтой — около 6—7%.

Потеря с отходящими газами. Все опыты на стенде 1953 г. проходили с коэффициентами избытка воздуха, близкими к 1, что в условиях промышленной установки приведет к значительному снижению потери q_2 . Подогрев воздуха позволит еще больше снизить эту потерю и довести ее до $q_2 = 7 \div 8\%$.

Потеря с физическим теплом шлака по опытам равна $0,5 \div 0,6\%$.

Компоновка топки с судовыми котлами. При создании первых промышленных образцов скоростная топка должна компоноваться с котлом в виде выносной, что не вызовет каких-либо серьезных трудностей, так как габариты ее не будут велики.

В дальнейшем, по мере накопления материалов по эксплуатации промышленного образца топки, необходимо приступить к разработке котла, органически связанного с топкой. В этом случае котел будет состоять в основном лишь из испарительных поверхностей нагрева, небольшого пароперегревателя и воздухоподогревателя. Экономайзерными поверхностями будут являться змеевики охлаждения топки, а зажимающая решетка явится частью пароперегревателя.

В этом случае весовые и габаритные показатели котла вместе с топкой будут весьма благоприятными вследствие высоких напряжений зеркала горения топки и отсутствия необходимости иметь большой топочный объем.

Кроме того, на размерах поверхностей нагрева собственно котла должны сказаться высокие температуры потока газов, близкие к 1800—2000°C, что позволит увеличить тепловые нагрузки этих поверхностей и позволит сократить их площадь.

Выводы

Теоретический анализ некоторых сторон процесса горения в слое скоростной топки и экспериментальное исследование процесса на различных стендах и главным образом на стенде 1953 г., позволяют сделать следующие выводы.

1) Экспериментальные исследования процесса полностью подтвердили правильность основных принципов, заложенных в конструкцию стенда топки скоростного горения для антрацита и позволили наладить устойчивое горение в слое с тепловыми напряжениями до 7 млн ккал/м² час при бесперебойном шлакоудалении в течение более чем 60 часов (из них 29 непрерывно). При этом сопротивление слоя и зажимающей решетки не превышало 100—160 мм в. ст.

2) Было выявлено, что для обеспечения устойчивого шлакоудаления при холодном дутье слой скоростной топки должен иметь равномерную высоту по площади решетки, равную $(7-9) \delta_0$, теплотери слоя не должны превышать величину $\frac{Q_{\text{обш}}}{V_{\text{обш}}} = 900-950$ ккал/кг, температура кокса, выходящего из зоны подготовки, должна быть выше 900—1000°C.

3) Установлено, что для ликвидации повышенного воздухопроницания краев слоя и периодических его прогаров, приводящих к шлакованию и расстройству процесса, необходимо непрерывно засыпать края слоя и прогары топливом, поступающим из зоны подготовки. Ручное засыпание слоя может быть с успехом заменено вращением шахты подготовки топлива, поставленной эксцентрично камере горения.

4) Исследование аэродинамики горящего скоростного слоя дало возможность установить, что для достижения наивыгоднейших сопротивлений высота слоя не должна превышать $(7-9) \delta_0$, а форсировка должна быть максимальной.

5) Теоретическое исследование процесса дало правильную качественную оценку влияния высоты слоя и его теплотери на температурный уровень в конце слоя, определяющий стационарность процесса жидкого шлакоудаления.

Экспериментом на стенде 1953 г. положения теоретического анализа были конкретизированы. Был также установлен ряд количественных зависимостей, характеризующих протекание процесса в скоростном слое.

6) Опыты на стенде 1953 г. не подтвердили положений Х. И. Колодцева о характере газообразования в слое вследствие резкого различия в гидродинамической обстановке реального и ла-

бораторного слоя, что приводило в опытах на стенде к увеличению размеров кислородной и восстановительной зон и создавало предпосылки к догоранию СО в межкусковых каналах кислородной зоны. Таким образом, результаты опытов Х. И. Колодцева и сделанные им выводы не могут быть полностью отнесены к условиям, имеющим место в реальном слое при скоростном процессе.

Наряду с выводами по исследованию теплового процесса в слое, многолетние опыты на различных стендах свидетельствуют о перспективности данного топочного устройства для судовых силовых установок и позволяют сделать следующие выводы:

1) Топка скоростного горения на антраците является высоконапряженным топочным устройством, соответствующим современным требованиям, предъявляемым к транспортным силовым установкам.

2) Топка скоростного горения осуществляет полную механизацию процесса топливосжигания.

3) Верхний предел форсировок слоя скоростных топок практически ничем не ограничен. Повышение тепловых напряжений слоя благоприятно сказывается на характере процесса горения.

4) Скоростная угольная топка имеет высокую равномерность тепловыделения в слое, не отличающуюся от факельного процесса. Скоростная топка обладает высокими маневренными качествами.

5) Тепловые потери промышленного образца топки и всей котельной установки значительно ниже тепловых потерь всех прочих установок, оборудованных слоевыми топками, работающими на антраците.

Все вышеизложенное позволяет рекомендовать перейти от опытов на стенде к созданию и исследованию промышленной скоростной топки.