

Федоренко Б.З., канд. физ.-мат. наук, доц.,
Горлов А.С., канд. техн. наук, доц.,
Петрашев В.И., ст. преподаватель

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МОДЕЛИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПНЫХ ЗАВЕСАХ ЦЕМЕНТНЫХ ПЕЧЕЙ

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с аэродинамикой цепных завес цементных печей мокрого способа производства: пылеосаждение и пылевынос из цементной печи; турбулентный пограничный слой на поверхности соприкосновения потоков газа между цепями и под цепями в цепной завесе; анализ экспериментальных данных по аэродинамике цепных завес с целью уточнения характера аэродинамических процессов. Получена оценка коэффициента пылеосаждения в цепной завесе цементной печи, позволяющая оценивать коэффициент пылеосаждения на работающей печи и оценивать значимость конструктивных мероприятий по увеличению пылеосаждения в цепной завесе и уменьшению пылевыноса. Представленная модель пылеосаждения в цепной завесе является линейной. При наличии соответствующих экспериментальных данных модель может быть уточнена с учетом ограниченности пылеосаждающих возможностей цепной завесы. Представлена оценка турбулентного пограничного слоя на поверхности соприкосновения потоков газа между цепями и под цепями в цепной завесе, которая показывает, что толщина пограничного слоя мала. Это означает, что в цепной завесе цементной печи достаточно четко выделяются потоки газа между цепями и под цепями и что незначителен заброс газа через пограничный слой из потока газа под цепями, обогащённого пылью, в поток газа между цепями для увеличения пылеосаждения на цепях. Приведены экспериментальные данные по аэродинамике цепных завес и цепей, полученные при участии БГТУ в этих работах. На основании этих данных уточняется характер аэродинамических процессов в цепных завесах. Анализ показывает, что возможно получение достаточно точных оценок аэродинамических коэффициентов сопротивления движению газа в цепных завесах, необходимых для построения математических моделей аэродинамики цепных завес цементных печей.

Ключевые слова: цепная завеса цементной печи, пылеосаждение и пылевынос из цементной печи, турбулентный пограничный слой, аэродинамика цепной завесы цементной печи.

Введение. Оптимизация производства цемента мокрым способом опирается, в том числе, на оптимизацию аэродинамических и теплообменных процессов в цементных печах. Одним из аспектов этого круга проблем является оптимизация аэродинамических и тепломассообменных процессов в цепных завесах цементных печей. В БГТУ для авторов работа над этими проблемами началась с 1989 года [1].

Первый этап этой работы завершился разработкой математической модели теплотехнологических процессов в цепных завесах цементных печей и комплекса программ расчёта этих процессов в 1993 году [2, 3]. Расчёты по разработанному комплексу программ давали правдоподобные результаты по оценке процессов в цепных завесах. Работа по уточнению моделей аэродинамики и тепломассообмена в цепных завесах и методики расчёта процессов была продолжена. Основные работы этого периода по аэродинамике и тепломассообмену в цепных завесах цементных печей [4–8]. Последняя работа с ОАО «Осколце-

мент» – проведение экспериментов по аэродинамике цепных завес по совместно разработанной программе закончилась в 2007 году [9]. Экспериментальные данные по аэродинамике цепных завес, полученные в работе [9], представляют собой ценную информацию для разработки математических моделей аэродинамических процессов в цепных завесах.

Адекватное представление об аэродинамических процессах в цепных завесах даёт возможность проведения анализа мероприятий по оптимизации и аэродинамических, и теплообменных процессов.

В настоящей работе рассматриваются следующие вопросы:

- разработка модели пылевыноса из печи и определение коэффициента пылеосаждения в цепной завесе;
- анализ экспериментальных данных по аэродинамике цепных завес и аэродинамических процессов в цепных завесах;
- представление модели свободного турбулентного пограничного слоя в спутных потоках

газа между цепями и под цепями в цепной завесе цементной печи.

Модель пылевыноса из цементной печи.

Одним из наиболее простых и эффективных способов использования пыли, выносимой отходящими газами из цементной печи, является вдувание пыли из электрофильтра за или в цепную за-

весу на повторный обжиг. Несмотря на недостатки, этот способ является наиболее оптимальным при больших пылевыносах из печи [10].

Представление о стационарном процессе пылевыноса из цементной печи можно получить из следующих моделей пылевыноса.

Процесс пылеобразования и пылевыноса из цементной печи без возвращения пыли схематически представлен на рис. 1а).



Рис. 1. Схема пылеобразования, пылеосаждения и пылевыноса из цементной печи:

а) схема без возвращения пыли; б) схема с возвращением пыли из электрофильтра;

X – пылеобразование в цементной печи; Y6, Yв – пылевынос из печи без возврата и с возвратом пыли в печь соответственно

Уравнение пылевыноса из цементной печи по схеме без возвращения пыли представляется в виде

$$Y_6 = (1 - k)X, \tag{1}$$

где k – коэффициент пылеосаждения в цепной завесе.

Процесс пылеобразования и пылевыноса из цементной печи с возвращением пыли в цепную завесу (или за цепную завесу) схематически представлен на рис. 1 б). Уравнение пылевыноса из цементной печи по схеме с возвращением пыли имеет вид

$$Y_в = \frac{1-k}{k}X. \tag{2}$$

Уравнение (2) получается из соотношения $(X + Y_в)(1 - k) = Y_в$.

В таблице 1 для наглядности представлены пылевынос Yв из печи с возвращением пыли в печь и циркулирующая в цепной завесе пыль (X + Yв) при различных значениях коэффициента пылеосаждения k.

При стационарном режиме работы цементной печи можно оценить коэффициент пылеосаждения в цепной завесе следующим образом. Определяется пылевынос в стационарном режиме работы печи при пылевозврате в печь, то

есть величина Yв. Затем отключается пылевозврат в печь и в стационарном режиме работы печи определяется пылевынос без пылевозврата, то есть величина Y6. Если процессы в печи при этих режимах работы сопоставимы, то коэффициент пылеосаждения в цепной завесе определяется на основании соотношений (1) и (2) и равен

$$k = \frac{Y_6}{Y_в}. \tag{3}$$

Таблица 1

Зависимость пылевыноса из печи Yв и циркулирующей в цепной завесе пыли (X + Yв) при различных значениях коэффициента k пылеосаждения в цепной завесе при работе цементной печи по схеме с возвращением пыли

Коэффициент пылеосаждения в цепной завесе, k	Пылевынос из печи, Yв	Циркулирующая в цепной завесе пыль, X + Yв
0.3	2.33 X	3.33 X
0.4	1.50 X	2.50 X
0.5	1.00 X	2.00 X
0.6	0.67 X	1.67 X
0.7	0.43 X	1.43 X

Модели пылевыноса и пылеосаждения (1) – (3) являются линейными. Они могут быть уточнены с учётом ограниченности пылеосаждающих возможностей цепных завес.

Экспериментальные данные по аэродинамике цепных завес. Цепными завесами и аэродинамикой цепных завес определяются процессы теплообмена и теплопередачи от газа через цепи материалу и процессы пылеобразования и пылеосаждения в цепных завесах.

Аэродинамика цепных завес сложна из-за сложной конструкции цепных завес. Едва ли

удастся создать достаточно точную модель аэродинамики цепных завес теоретически, без использования экспериментальных данных. Исходя из этого была сделана попытка получения экспериментальных данных по аэродинамике цепных завес [9]. Эксперименты проведены на цементной печи № 6 ОАО «Осколцемент» размера 5×185 м. Схема цепной завесы и схема навески цепей приведены на рис. 2 и 3. Параметры цепной завесы представлены в таблице 2.

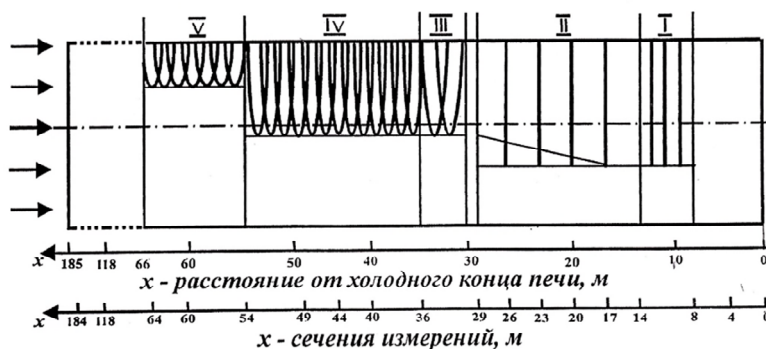


Рис. 2. Схема цепной завесы

- а) коврик, участок V
- б) гирляндная навеска, участки III, IV
- в) свободновисящая навеска, участки I, II.

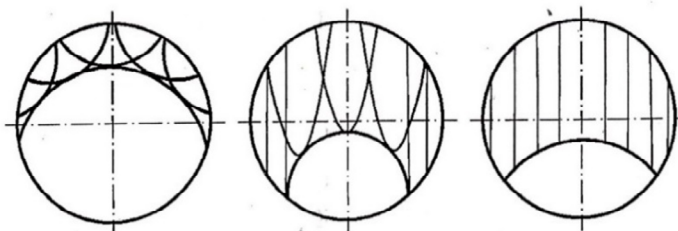


Рис. 3. Схемы навески цепей

Таблица 2

Параметры цепной завесы печи

Номер участка цепной завесы	I	II	III	IV	V
Тип навески цепей	св. вис.	св. вис.	гирл.	гирл.	гирл.
Плотность навески цепей, м ² /м ²	5.2	2.8	5.8	8.7	4.9
Число заходов цепной завесы	6	4	6	6	6
Длина цепей, м	3.6	3.6	5.76	5.76	2.8
Эффективная длина (провисание), м	3.6	3.6	2.74	2.74	0.89
Длина участка, м	5.5	15	7.2	18	11
Форма и размеры звеньев, ед.	круг 25×120	круг 25×120	овал 25×120	овал 25×120	овал 25×120

Примечания: свободный участок с холодного конца длиной 8.3 м.

На выходе в пыльную камеру шайба высотой 900 мм.

Схема навески гирлянды с первого отверстия на первое соседнего винта.

Экспериментальные исследования аэродинамики проводились на холодных остановленных печах при температуре 10 °С. В таблице 3 приведены результаты экспериментов с новой цепной завесой с литыми шероховатыми цепями, на печи без материала.

В таблице 4 приведены результаты экспериментов на той же печи, с той же цепной завесой, но с цепями, проработавшими 7 месяцев, и со слоем материала толщиной 900 мм по всей длине печи.

На стыке участков цепной завесы с гирляндной и свободно висящей навеской (сечение $x=28.8$ м) имеется порог высотой 0.86 м за счёт разности провисания цепей с гирляндной и свободно висящей навеской. Площадь живого сечения при переходе через это сечение уменьшается. Скорость движения воздуха под цепями возрастает, хотя часть воздуха перетекает в область, занятую цепями. С увеличением открытия шиберов скорость воздуха растёт. Сильно возрастает скорость воздуха за сечением $x=28.8$ м (см. сечение измерения $x=29$ м в табл. 3).

В экспериментах на печи с цепями, бывшими в работе 7 месяцев, и со слоем материала (табл. 4) на участке II цепной завесы цепи были подвязаны так, чтобы длина провисания их линейно возрастала с 2.74 до 3.6 м. Площадь живого сечения под цепями уменьшалась постепенно. Это привело к относительному уменьшению скорости в сечении измерения $x=29$ м (см. табл. 4).

Экспериментальные данные по аэродинамике цепей. Адекватное представление об аэродинамике цепей можно получить на основании аэродинамических экспериментов. Такая работа была проведена в аэродинамической лаборатории Харьковского авиационного института. Данные по аэродинамическому коэффициенту сопротивления гладких цепей по результатам аэродинамического эксперимента представлены на рис. 4 [7]. Коэффициент сопротивления одиночной вертикально висящей аэродинамически гладкой цепи можно представить в виде

$$\xi_0 = \frac{6.6}{W^2} + 2.2, \quad (4)$$

где W – безразмерная величина, равная численному значению скорости набегающего потока в м/с.

Таблица 3

Скорость движения воздуха в пустой печи

Номер серии измерений	Открытие шиберов в, %	Др, мм вод. ст.	Номер точки измерения	Сечение измерения x , м										
				184	118	64	60	54	40	36	29	14	8	
1	10	14.5	4	3.5	3.7	3.1	2.6	3.0	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	2.6
			3	3.5	2.5	3.2	3.9	3.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1	2.6
			2	3.9	2.5	3.4	4.0	3.7	4.9	5.1	4.8	4.6	4.3	
			1	3.5	2.5	3.2	4.0	3.6	5.1	4.9	5.4	4.6	4.4	
2	15	15	4	3.4	2.5	3.2	2.5	3.0	3.2	2.6	2.8	3.2	3.1	
			3	3.4	2.6	3.5	3.8	3.4	3.5	3.1	3.2	3.4	3.4	
			2	3.7	2.5	3.5	4.1	3.8	5.0	5.8	5.8	4.8	4.8	
			1	3.9	2.5	3.4	4.0	3.9	4.8	5.4	5.5	4.9	4.9	
3	20	18.5	4	3.5	3.1	3.6	2.6	3.2	3.6	3.1	3.2	3.5	3.4	
			3	3.7	3.2	3.6	4.3	3.8	3.6	3.2	3.0	3.6	3.4	
			2	4.1	3.1	3.8	4.3	4.3	5.2	6.8	8.9	5.5	4.8	
			1	3.7	3.0	3.7	4.2	4.3	5.0	7.3	8.9	5.8	5.0	
4	25	23	4	4.1	3.5	4.1	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6	3.8	–	
			3	4.2	3.6	4.0	4.6	4.0	3.6	3.6	3.8	3.9	–	
			2	4.7	3.5	4.1	4.8	4.8	6.4	10.3	4.2	7.7	–	
			1	4.7	3.4	3.9	4.7	4.8	6.4	8.0	15.8	7.7	–	
5	30	32.5	4	4.4	3.8	4.4	4.1	4.1	4.2	3.6	4.3	4.1	4.1	
			3	4.5	3.9	4.4	5.0	4.3	4.4	3.9	4.3	4.2	4.1	
			2	4.9	3.7	4.5	5.2	5.4	11.3	13.6	26.8	12.0	7.3	
			1	5.4	3.7	4.4	5.1	4.9	10.0	13.6	25.3	12.0	13.0	
6	35	45	4	4.7	4.2	4.9	4.3	3.0	4.7	4.2	–	4.4	4.2	
			3	5.0	4.3	4.8	6.0	4.8	4.8	4.1	–	4.5	4.3	
			2	6.8	4.1	4.8	6.5	7.7	14.6	16.4	–	14.4	6.4	
			1	6.5	4.0	4.8	6.5	6.8	14.4	16.6	–	15.6	15.8	
7	40	60	4	5.2	4.4	5.2	4.3	3.5	4.8	4.3	5.2	4.6	4.4	
			3	5.8	4.4	5.1	6.4	5.5	5.1	4.2	5.2	4.7	4.7	
			2	8.4	4.4	5.2	8.0	9.3	16.6	18.6	27.0	16.6	9.3	
			1	8.4	4.3	5.1	8.0	9.3	16.4	19.4	27.3	18.2	17.8	
8	45	77	4	5.4	4.7	6.4	4.6	3.1	4.9	4.5	–	4.8	–	
			3	7.7	4.7	5.8	7.3	6.4	5.5	5.4	–	5.0	–	
			2	8.4	4.8	5.8	10.8	12.6	19.2	22.0	–	19.1	–	
			1	12.0	4.4	5.4	9.3	12.0	18.1	22.4	–	19.2	–	

Примечания:

- измерения проводились на вертикальной оси печи;
- перепад давления Δp – это разность давлений в пыльной камере и головке печи;
- скорость движения воздуха в м/с
- номера точек измерения приведены на рис.

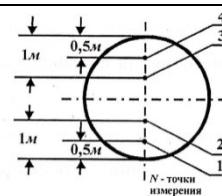


Таблица 4

Скорость движения воздуха в печи с материалом

Открытие шиберов в %	Δr мм вод. ст.	Номер точки измерения	Сечение измерения x, м												
			118	64	59	54	49	44	36	29	26	23	20	17	4
30	57	2	10.2	14.5	15.6	15.6	7.7	12.2	16.6	15.2	13.8	13.8	16.6	15.2	18.2
		1	10.6	15.6	16.6	17.0	18.8	22.1	34.8	29.3	30.7	28.2	31.5	25.7	26.5

Примечания:

- измерения проводились на вертикальной оси печи;
- номера точек измерения приведены на рис.;
- толщина слоя материала ~ 900 мм по всей печи;
- высота шайбы в печи на выходе в пыльную камеру 900 мм;
- скорость движения воздуха в м/с
- на стыке гирляндной и свободно висящей цепных завес плавный переход длины свободновисящих цепей (см. рис. 2)

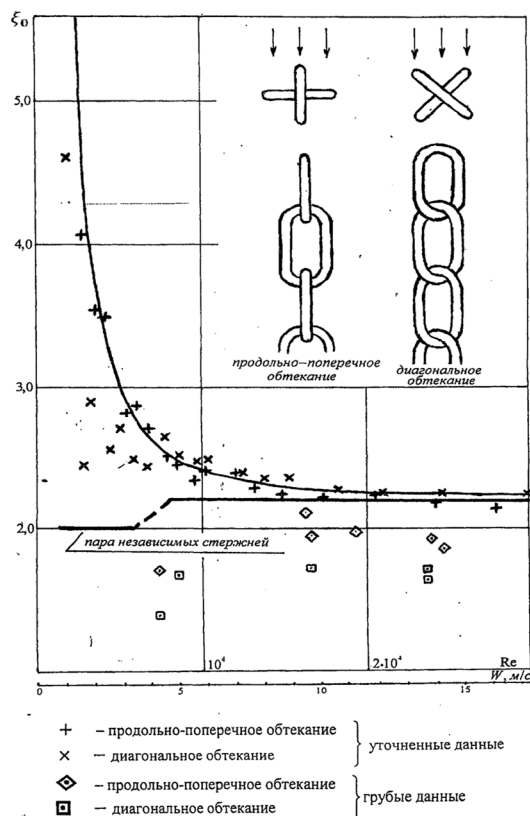
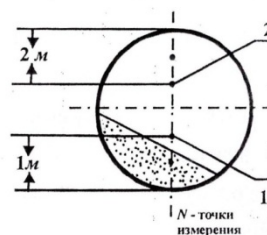


Рис. 4. Экспериментальные данные по коэффициенту сопротивления ξ_0 цепи ЦОН-25

Анализ характера аэродинамических процессов и модель аэродинамики цепной завесы цементной печи. Создание достаточно полной

модели аэродинамических процессов в цепной завесе – чрезвычайно сложная задача. Начальный этап – это разработка оценочных правдоподобных моделей. Наличие экспериментальных данных по аэродинамике цепной завесы и цепей позволяет получить представление о характере аэродинамики цепных завес на простых моделях аэродинамики на отдельных участках цепной завесы.

На достаточно длинных участках цепной завесы (например, на участках II и IV (см. табл. 2) во второй половине участков по движению газа следует ожидать установления стационарного распределения газа в зоне, занятой цепями, и в зоне под цепями, и отсутствия перетока газа из зоны в зону. В этом случае описание аэродинамики участка может быть дано на основании модели Кирхгофа. Аэродинамика участка цепной завесы описывается следующей системой уравнений:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2, \tag{5}$$

$$S_1 W_1 + S_2 W_2 = SW, \tag{6}$$

где $\Delta p_1, \Delta p_2$ – потери напора на участке длины L в зоне, занятой цепями, и в зоне под цепями; W_1, W_2, W – скорости газа в зоне, занятой цепями, в зоне под цепями и в зоне печи без цепей; S_1, S_2, S – площади живого поперечного сечения печи в зоне, занятой цепями, в зоне под цепями и всей печи.

Потеря напора (или перепад давления) на участке печи L в зоне под цепями описывается формулой Дарси-Вейсбаха [11, 12]:

$$\Delta p_2 = \lambda_2 \frac{L}{D} \frac{\rho W_2^2}{2}, \quad (7)$$

где λ_2 – коэффициент сопротивления части трубы под цепями; D – эквивалентный диаметр трубы; ρ – плотность газа; W_2 – средняя скорость газа в печи под цепями. Для перепада давления в зоне печи под цепями Δp_2 коэффициент сопротивления в случае турбулентного движения газа оценивается:

– в случае аэродинамически гладкой стенки формулой Блазиуса

$$\lambda_2 = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}, \quad (8)$$

где Re – число Рейнольдса; $Re = \frac{W_2 D}{\nu}$; D – эквивалентный диаметр трубы для зоны печи под цепями; ν – кинематическая вязкость газа;

– в случае шероховатой стенки – формулой Шифринсона

$$\lambda_2 = 0.11 \left(\frac{k}{D}\right)^{0.25}, \quad (9)$$

где $\frac{k}{D}$ – относительная шероховатость. Кроме шероховатости на коэффициент сопротивления сильное влияние может оказать и волнистость поверхности [11, 13].

Для перепада давления в зоне печи, занятой цепями Δp_1 , используется формула потери напора для местных сопротивлений [11]:

$$\Delta p_1 = \xi_1 \frac{\rho W_1^2}{2} = \lambda_1 \frac{L}{D} \frac{\rho W_1^2}{2}, \quad (10)$$

где ξ_1 – коэффициент местных потерь (в рассматриваемом случае – это коэффициент сопротивления шторы цепей); $\lambda_1 = \lambda_{эф} = \xi_1 \frac{D}{L}$ – эффективный распределённый коэффициент сопротивления шторы цепей, L – длина, равная расстоянию между шторами цепей. Коэффициент сопротивления шторы цепей ξ_1 представляется в виде:

$$\xi_1 = \xi_0 \eta_k \eta_c, \quad (11)$$

где ξ_0 – коэффициент сопротивления одиночной цепи (формула (4)); η_k – коэффициент шероховатости цепи; η_c – коэффициент стеснённости потока газа в шторе между цепями [14].

Данные для определения границ турбулентного течения в трубе в условиях аэродинамически гладкой стенки и в условиях развитой шероховатости на стенке представлены на рис. 5 и 6.

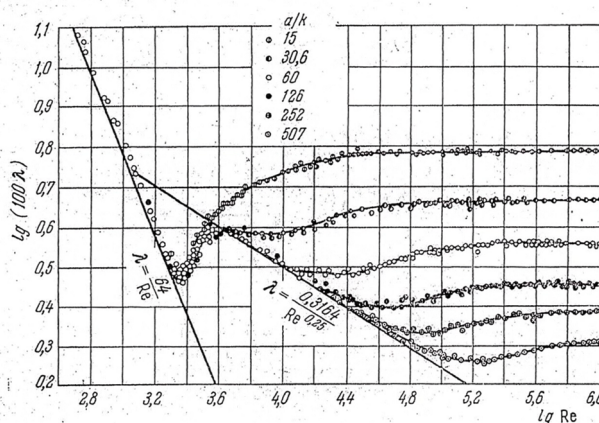


Рис. 5. Области течения в трубе с аэродинамически гладкими стенками и течения в условиях развитой шероховатости

($\frac{k}{a}$ – относительная шероховатость, a – радиус трубы) [12]

На рис. 5 приведены данные по определению границ аэродинамически гладкого течения и течения в условиях развитой шероховатости на стенке трубы и, следовательно, применимости формул Блазиуса и Шифринсона [11, 12]. На рис. 6 приведены данные по зависимости коэффициента ξ аэродинамического сопротивления цилиндра при поперечном обтекании от числа Рейнольдса и по коэффициенту η_k , учитывающему шероховатость цилиндра [14].

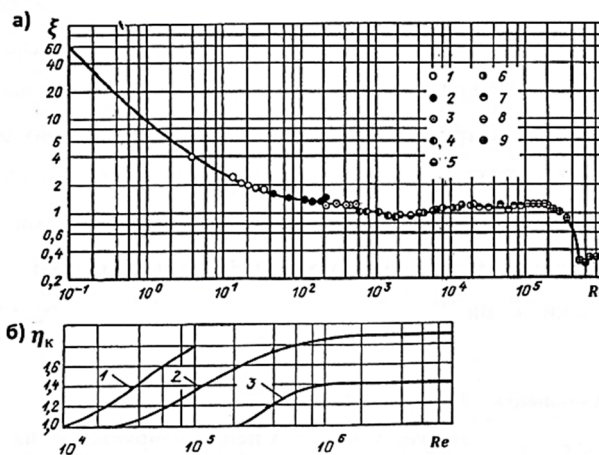


Рис. 6. Зависимость от числа Рейнольдса: а) коэффициента ξ аэродинамического сопротивления цилиндра при поперечном обтекании; б) коэффициента η_k , учитывающего шероховатость цилиндра при:

1) $\frac{k}{d} = 15 \cdot 10^{-3}$, 2) $\frac{k}{d} = 5 \cdot 10^{-3}$, 3) $\frac{k}{d} = 1 \cdot 10^{-3}$,

где $\frac{k}{d}$ – относительная шероховатость, k – абсолютная шероховатость в мм, d – диаметр цилиндра в мм [14]

Равенство (5) $\Delta p_1 = \Delta p_2$ может быть представлено в виде $\lambda_1 W_1^2 = \lambda_2 W_2^2$ или

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{W_2^2}{W_1^2}, \quad (12)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты сопротивления течению газа в зоне, занятой цепями, и под цепями на длине L , равной расстоянию между шторами цепей.

В таблице 5 приведены значения отношения λ_1/λ_2 для участков цепной завесы IV и II для пустой печи с новыми цепями, для сечений измерений 40 м и 14 м. Величина W_2 взята для точки измерения № 2, величина W_1 взята для точки измерения № 3.

В таблице 6 приведены значения отношения λ_1/λ_2 для участков цепной завесы IV (сечения 44 и 36 м) и II (сечения 20 и 17 м) для печи с цепями, проработавшими 7 месяцев, и с материалом в печи по всей длине.

Приведенные в таблице 5 экспериментальные данные могут быть интерпретированы следующим образом. При обтекании потоком газа

цепей с малой скоростью W_1 бугорки шероховатости погружены в вязкий подслоя. Шероховатая цепь является аэродинамически гладкой. Коэффициент сопротивления шторы цепей λ_1 с ростом скорости W_1 уменьшается в соответствии с коэффициентом сопротивления ξ_0 на рис. 4. При дальнейшем увеличении скорости потока газа W_1 шероховатость цепей начинает проявляться, бугорки шероховатости выходят за пределы вязкого подслоя. Коэффициент сопротивления λ_1 начинает увеличиваться с ростом скорости W_1 , что и видно по таблице 5 (см. данные о $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ при перепадах давления 14.5, 15, 18.5 мм вод. ст.). Коэффициент сопротивления λ_2 остаётся при этом примерно постоянным (об этом см. ниже).

Таблица 5

Отношение λ_1/λ_2 для пустой печи с шероховатыми цепями

Участок цепной завесы и сечение измерения		Перепад давления, Δp , мм вод. ст.							
		14.5	15	18.5	23	32.5	45	60	77
IV, 40 м	λ_1/λ_2	2.67	2.04	2.08	3.16	6.59	9.25	10.59	12.18
	W_1 , м/с	3.0	3.5	3.6	3.6	4.4	4.8	5.1	5.5
	W_2 , м/с	4.9	5.0	5.2	6.4	11.3	14.6	16.6	19.2
II, 14 м	λ_1/λ_2	2.20	1.99	2.33	3.89	8.16	10.24	12.47	14.59
	W_1 , м/с	3.1	3.4	3.6	3.9	4.2	4.5	4.7	5.0
	W_2 , м/с	4.6	4.8	5.5	7.7	12.0	14.4	16.6	19.1

Таблица 6

Отношение λ_1/λ_2 для печи с материалом и цепями, проработавшими 7 месяцев

Участок цепной завесы	IV		II	
	44	36	20	17
Сечение измерения, x , м	44	36	20	17
Значение λ_1/λ_2	3.28	4.39	3.60	2.85
W_1 , м/с	12.2	16.6	16.6	15.2
W_2 , м/с	22.1	34.8	31.6	25.7

В зоне цепной завесы под цепями на стенке цементной печи находится слой цепей. На поверхности слоя цепей можно выделить два вида шероховатостей – шероховатость поверхности цепей и шероховатость, образованную самими цепями, которая на несколько порядков выше шероховатости поверхности цепей. Коэффициент сопротивления стенки λ_2 в зоне под цепями должен учитывать эти два вида шероховатостей. Чем меньше относительная шероховатость, тем в большем диапазоне скоростей W_2 (или чисел Рейнольдса) наблюдается обычное турбулентное движение, соответствующее гладким трубам (и

использованию формулы Блазиуса для расчётов сопротивления). С увеличением относительной шероховатости тормозящее влияние обтекаемой поверхности всё больше зависит от шероховатости – это режим течения при развитой шероховатости (для расчётов сопротивления при этом используется формула Шифринсона). Данные результатов экспериментов показывают, что под цепями не исключён режим течения газа при развитой шероховатости, создаваемой слоем цепей на стенке печи. К сожалению, имеющихся экспериментальных данных недостаточно для выявления характера течения в цементной печи. Данные эксперимента могут служить для проверки правильности принятых моделей течений (и коэффициентов сопротивлений). Однако с учётом большей определённости знания характера течения газа под цепями и коэффициента сопротивления λ_2 возможно (на основании имеющихся экспериментальных данных) получение представления о характере течения газа в зоне, занятой цепями, и о коэффициенте сопротивления цепных завес λ_1 .

В заключение следует сказать, что после решения вопроса о выборе коэффициентов сопротивления штор цепных завес λ_1 и коэффициента

сопротивления стенки печи λ_2 (в зоне под цепями) при разных режимах течения газа, можно перейти к разработке модели аэродинамики всей цепной завесы. Простейшей из таких моделей может быть модель Кирхгофа [7].

Свободный пограничный слой на границе раздела потоков газа в зоне цепной завесы, занятой цепями, и под цепями. Движение газа в цепной завесе цементной печи является турбулентным. При этом ярко выражены два потока: поток газа между цепями и поток газа под цепями. От каждой шторы цепей вниз по потоку на границе раздела потоков образуется плоский пограничный слой – свободный пограничный слой (свободный потому, что на пути пограничного

слоя нет ограничивающих поверхностей). Картина свободного пограничного слоя представлена на рис. 7.

Углом β_2 расширения пограничного слоя определяется заброс на цепи шторы цепной завесы газа из потока под цепями, обогащённого пылью, поднимаемой потоком газа с поверхности материала на поду цементной печи. Это приводит к увеличению пылесаживания на цепях в цепной завесе (углом β_0 определяется луч, на котором скорость газа равна средней скорости потоков $W_0 = \frac{1}{2}(W_1 + W_2)$). Поэтому задача о свободном турбулентном пограничном слое представляет практический интерес.

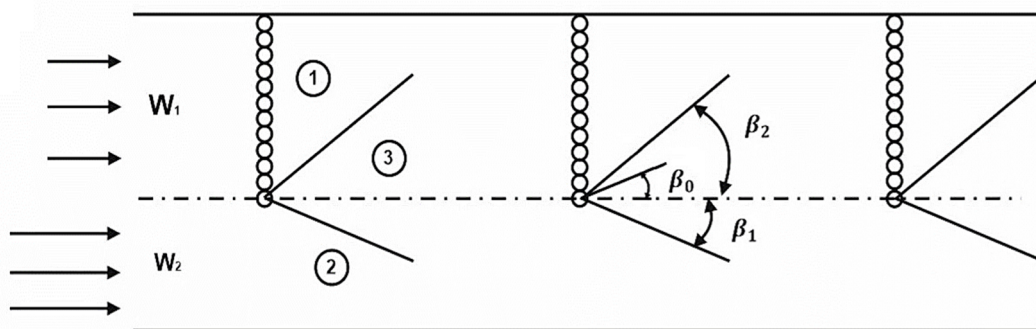


Рис. 7. Картина движения газа в цепной завесе цементной печи:

- 1 – поток газа в зоне, занятой цепями; 2 – поток газа в зоне под цепями;
- 3 – свободный турбулентный пограничный слой; W_1, W_2 – средние скорости газа в зоне, занятой цепями, и в зоне под цепями

Задача о свободном турбулентном пограничном слое, образующемся при смешении струи газа большого диаметра с окружающим её неподвижным газом, рассмотрена Толмином [12, 15], а задача о свободном турбулентном слое, образующемся при смешении плоских спутных потоков рассмотрена Гертлером [15].

Задача Толмина о свободном турбулентном пограничном слое в области смешения потока газа с неподвижным газом [12]. На рис. 8 приведена схема свободного пограничного слоя.

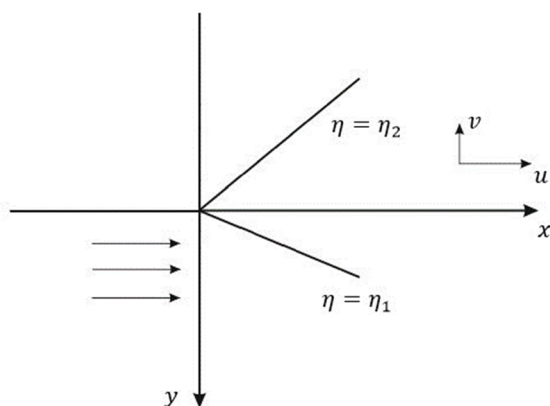


Рис. 8. Схема свободного пограничного слоя

Уравнение осреднённого турбулентного движения в пограничном слое представляются в виде

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (13)$$

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2, \quad (14)$$

где u, v – продольная и поперечная составляющие скорости газа, ρ – плотность газа, τ – напряжение трения, $l = l(x)$ – путь смешения Прандтля (первая гипотеза Прандтля, 1924 г.).

Вводится функция тока $\psi(x, y)$, так что $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$. Уравнения движения (13) принимают вид

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = l^2(x) \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3}. \quad (15)$$

Во всей области давление принимается постоянным. Величина $l = l(x)$ постоянна по поперечному сечению и зависит только от x . Скорость в невозмущённой части струи равна U_0 . Граничные условия для уравнения (15) следующие:

$$\psi \rightarrow U_0 y, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} \rightarrow U_0 \text{ при } y \rightarrow \infty, x > 0;$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = U_0 \text{ при } x = 0, y > 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \rightarrow 0 \text{ при } y \rightarrow -\infty, x > 0;$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \text{ при } x = 0, y < 0. \quad (17)$$

Если принять функцию тока $\psi(x, y)$ в виде

$$\psi = U_0 x \varphi\left(\frac{y}{x}\right) = U_0 x \varphi(\eta), \quad \eta = \frac{y}{x}, \quad (18)$$

то задача становится автомодельной, то есть уравнение с частными производными (15) сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$-\varphi \varphi'' = \frac{l^2}{x^2} \varphi'' \varphi'''. \quad (19)$$

При этом

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = U_0 \varphi'(\eta), \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = U_0 [\varphi(\eta) - \eta \varphi'(\eta)]. \quad (20)$$

Если принять

$$l(x) = cx, \quad (21)$$

то уравнение (19) принимает вид

$$\varphi''(c^2 \varphi''' + \varphi) = 0, \quad (22)$$

которое распадается на два уравнения

$$c^2 \varphi''' + \varphi = 0, \quad (23)$$

$$\varphi'' = 0. \quad (24)$$

Уравнение (24) соответствует движению в невозмущённой струе. Условия (16) и (17) дают при этом уравнения

$$\begin{aligned} \varphi(\eta) = \eta, \quad \varphi'(\eta) = 1, \quad y > 0, \\ \varphi(\eta) = \eta, \quad \varphi'(\eta) = 0, \quad y < 0. \end{aligned}$$

Наименьший положительный корень η_1 уравнения $\varphi'(\eta) = 1$ и наименьший по абсолютной величине корень η_2 уравнения $\varphi'(\eta) = 0$ определяют прямолинейные границы пограничного слоя смешения струи с окружающим её неподвижным газом:

$$\eta = \frac{y}{x} = \eta_1, \quad \eta = \frac{y}{x} = \eta_2. \quad (25)$$

Ширина струи пограничного слоя равна

$$b = b(x) = (\eta_1 - \eta_2)x. \quad (26)$$

Общее решение уравнения (23) имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi(\eta) = C_1 e^{-\alpha \eta} + C_2 e^{\frac{1}{2} \alpha \eta} \cos \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha \eta + \\ + C_3 e^{\frac{1}{2} \alpha \eta} \sin \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha \eta, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\alpha = c^{-\frac{2}{3}}, \quad (28)$$

где α – единственная эмпирическая постоянная задачи (c – величина в соотношении (21)).

Для определения произвольных постоянных C_1, C_2, C_3 и граничных условий η_1 и η_2 используются следующие условия:

$$\begin{aligned} \varphi''(\eta_1) = 0, \quad \varphi'(\eta_1) = 1, \quad \varphi(\eta_1) = \eta_1, \quad \varphi'(\eta_2) = 0, \\ \varphi''(\eta_2) = 0. \end{aligned}$$

Исходя из этих условий, получается:

$$\begin{aligned} C_1 = -0.0062, \quad C_2 = 0.987, \quad C_3 = 0.577, \\ \alpha \eta_1 = 0.981, \quad \alpha \eta_2 = -2.04. \end{aligned} \quad (29)$$

На основании экспериментальных данных получено значение величины $\alpha = 11.8$. Следует

заметить, что величина α и c из формулы (21) зависят от предыстории потока, то есть от турбулентности набегающего потока.

Продольная u и поперечная v составляющие скорости в пограничном слое определяются с использованием формул (27) и (20) на основании соотношений $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$.

С учётом (29), ширина пограничного слоя $b(x)$ получается следующей:

$$b(x) = \frac{\alpha \eta_1 - \alpha \eta_2}{\alpha} x = \frac{3.021}{11.8} x = 0.256x. \quad (30)$$

Решение задачи Толмина в [15] даёт для определённого по экспериментам значения

$$\alpha = 11.1, \quad a = \frac{1}{\alpha} = 0.09. \quad (31)$$

Ширина пограничного слоя при этом получается равной

$$b(x) = 0.27x. \quad (32)$$

Задача Гертлера о свободном турбулентном слое, образуемом при смешении плоских спутных потоков. Гертлер получил решение для турбулентного слоя смешения двух плоскопараллельных потоков исходя из новой теории Прандтля турбулентной вязкости (1944 г.), согласно которой напряжение трения в струе

$$\tau = \rho c \delta |u_m - u_\delta| \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (33)$$

где c – постоянная, определяемая из опыта; δ – толщина пограничного слоя; $u_m = u_0, u_\delta$ – скорости спутных потоков, $u_\delta < u_m$.

Уравнения осреднённого турбулентного движения в пограничном слое представляются в виде (13), но величина τ берётся по формуле (33). Функция тока ψ берётся в виде

$$\psi = Ux\varphi(\eta), \quad (34)$$

где

$$U = \frac{1}{2}(u_0 + u_\delta), \quad (35)$$

$$\eta = \sigma \frac{y - y_{0.5}}{x}, \quad (36)$$

σ – величина, определяемая из эксперимента, $y_{0.5}$ – ордината линии, на которой скорость $U = \frac{u_0 + u_\delta}{2}$. Продольная и поперечная скорости находятся по формулам

$$\frac{u}{U} = \sigma \varphi'(\eta), \quad \frac{v}{U} = \eta \varphi'(\eta) - \varphi(\eta). \quad (37)$$

При подстановке в уравнения (13) величины τ по формуле (33), функций u и v по формулам (37) получается уравнение, описывающее пограничный слой

$$\varphi'''' + 2\sigma \varphi \varphi'' = 0. \quad (38)$$

Решение этого уравнения ищется в виде ряда

$$\sigma \varphi = \sum_{v=0}^{\infty} \lambda^v F_v(\eta), \quad (39)$$

где

$$\lambda = \frac{u_0 - u_\delta}{u_0 + u_\delta}. \quad (40)$$

Гертлер нашёл, что функции $F_0(\eta)$ и $F_1(\eta)$ составляют основную часть ряда (39) и остальными

слагаемыми можно пренебречь. Для этих функций получается:

$$F_0(\eta) = \eta, \quad (41)$$

$$F_1''' + 2\eta F_1'' = 0, \quad (42)$$

$$F_1'(0) = 0, F_1'(\eta) = \pm 1 \text{ при } \eta = \pm\infty. \quad (43)$$

Интегрирование уравнения (42) при условиях (43) даёт

$$F_1'(\eta) = \operatorname{erf}(\eta), \quad (44)$$

где $\operatorname{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta$ – интеграл вероятности. Продольная составляющая скорости u определяется по формуле

$$\frac{u}{U} = 1 + \lambda \operatorname{erf}(\eta). \quad (45)$$

Выражение для продольной составляющей скорости u в зоне смешения двух спутных потоков приводится к виду

$$\frac{u-u_\delta}{u_0-u_\delta} = 0.5(1 + \operatorname{erf}(\eta)) \quad (46)$$

Выражение для поперечной скорости в пограничном слое получается в виде

$$\sigma \frac{v}{U} = \lambda \eta \operatorname{erf}(\eta) - \int_0^\eta \operatorname{erf}(\eta) d\eta - 0.528. \quad (47)$$

Положение линии $\eta = 0$, на которой скорость равна $U = \frac{1}{2}(u_0 + u_\delta)$ и относительно которой границы зоны смешения симметричны – это линия

$$\eta_0 = \sigma \frac{y_{0.5}}{x} = -0.528. \quad (48)$$

В теории Гертлера пограничный слой является асимптотическим ($-\infty < y < \infty$), а в теории Толмина – конечной толщины. Поэтому в решении Гертлера под толщиной пограничного слоя можно понимать конечное расстояние между двумя точками, в одной из которых скорость близка к u_0 , а в другой – к u_δ . Например,

$$u_1 - u_\delta = 0.9835(u_0 - u_\delta), \\ u_2 - u_\delta = 0.0165(u_0 - u_\delta). \quad (49)$$

Используя формулу (46), получаем:

$$\operatorname{erf}(\eta_1) = 0.967 \Rightarrow \eta_1 \approx 1.51, \\ \operatorname{erf}(\eta_2) = -0.967 \Rightarrow \eta_2 \approx -1.51.$$

Если исходить из данных экспериментов $\sigma = \frac{1}{a} = \frac{1}{0.09} = 11.1$ (см. (31)), то ширина конечного пограничного слоя окажется равной

$$b(x) = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\sigma} x = \frac{3.02}{11.1} x = 0.27x. \quad (50)$$

Границы конечного пограничного слоя в (49) выбраны из условия совпадения ширины конечного пограничного слоя по Гертлеру с шириной конечного пограничного слоя по Толмину (32).

Ширина пограничного слоя в спутных потоках $b_c(x)$ со скоростями u_0 и u_δ ($u_\delta < u_0$) определяется формулой

$$b_c(x) = \frac{u_0 - u_\delta}{u_0 + u_\delta} b(x) = \frac{1-m}{1+m} b(x), \quad (51)$$

где $m = \frac{u_\delta}{u_0}$, $b(x)$ – ширина пограничного слоя при смешении потока газа с неподвижным газом.

Приведём сводные данные по свободному пограничному слою для случая, когда параметр $\sigma = a = 11.1$, $a = \frac{1}{\alpha} = 0.09$ при смешении газа с неподвижным газом:

– угол β_1 между прямой $y = \eta_1 x$ и осью Ox равен

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{\eta_1}{\alpha} = \operatorname{arctg} \frac{0.981}{11.1} = 5.05^\circ;$$

– угол β_2 между прямой $y = \eta_2 x$ и осью Ox равен

$$\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{\eta_2}{\alpha} = \operatorname{arctg} \left(-\frac{2.04}{11.1} \right) = -10.41^\circ;$$

– угол β_0 между прямой $y = \eta_0 x$ и осью Ox равен

$$\beta_0 = \operatorname{arctg}(-0.528/11.1) = -2.72^\circ;$$

(β_0 – угол, относительно которого пограничный слой симметричен, и на луче этого угла скорость равна средней скорости спутных потоков);

– угол раствора пограничного слоя $\beta = \beta_1 - \beta_2 = 15.46^\circ$.

При отношении скоростей спутных потоков $m = \frac{1}{2}$, что имеет место, например, в экспериментальных данных по аэродинамике цепных завес (см. табл. 6, сечения измерений 36 м и 20 м), ширина пограничного слоя равна

$$b_c(x) = \frac{1}{3} b(x). \quad (52)$$

При этом получаются углы $\beta_1 = 1.68^\circ$; $\beta_2 = -3.47^\circ$; $\beta_0 = -0.91^\circ$; $\beta = 5.15^\circ$. Продольные скорости меняются плавно от $u_0 = W_2$ на луче угла β_1 до $u_\delta = W_1$ на луче угла β_2 при значении $\frac{1}{2}(u_0 + u_\delta) = \frac{1}{2}(W_2 + W_1)$ на луче угла β_0 .

Приведенные оценки показывают, что заброса на шторы цепей газа из потока под цепями практически нет: граница заброса под углом $\beta_2 = 3.5^\circ$, а заброс газа со средней скоростью потоков $\frac{W_2+W_1}{2}$ происходит под углом $\beta_0 \approx 1^\circ$.

Заключение. 1. Получена оценка коэффициента пылеосаждения в цепной завесе цементной цепи, позволяющая оценивать коэффициент пылеосаждения на работающей печи и оценивать значимость конструктивных мероприятий по увеличению пылеосаждения в цепной завесе и уменьшению пылевыноса.

2. Представлена оценка турбулентного пограничного слоя на поверхности соприкосновения потоков газа между цепями и под цепями в цепной завесе. Представленная оценка показывает, что толщина пограничного слоя мала. Это означает, что в цепной завесе цементной печи достаточно чётко выделяются потоки газа между цепями и под цепями и что незначителен заброс газа через пограничный слой из потока газа под цепями, обогащённого пылью, в поток газа между цепями для увеличения пылеосаждения на цепях.

3. Проведен анализ экспериментальных данных по аэродинамике цепей и цепных завес. Анализ показывает, что возможно получение достаточно точных оценок аэродинамических коэффициентов сопротивления движению газа в цепных завесах, необходимых для построения математических моделей аэродинамики цепных завес цементных печей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоренко Б.З., Классен В.К. Математическая модель процессов тепломассопереноса в цепной зоне цементной печи // Материалы Всесоюзной конференции «Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении». Белгород: БТИСМ. 1989. С. 113.

2. Федоренко Б.З. Математическая модель теплотехнологических процессов в цепных завесах вращающихся цементных печей // Цемент. 1993. № 3. С. 18–22.

3. Федоренко Б.З., Борзенков А.В., Петрашев В.И. Комплекс программ для расчёта теплотехнологических процессов в цепных завесах вращающихся цементных печей // Цемент. 1993. № 3. С. 17–18.

4. Федоренко Б.З., Горлов А.С. Математическое моделирование управления движением материала в зоне цепной завесы вращающейся цементной печи // Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций: Междунар. конф., Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1995. С. 91–92.

5. Федоренко Б.З. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в цепных завесах цементных печей // Известия ВУЗов. Строительство. 2000. № 10. С. 129–135.

6. Федоренко Б.З. Моделирование, анализ и оптимизация теплотехнологических процессов в цепных завесах цементных печей // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы Седьмых академ. чтений РААСН, Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2001. Ч. 2. С.347–359.

7. Федоренко Б.З. Математическая модель аэродинамики вращающейся цементной печи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 6. С. 401–421.

8. Федоренко Б.З. Турбулентное движение жидкости: уточнённая модель Прандтля // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2005. № 10. С. 302–306.

9. Степанов В.В., Чеботарь А.А., Федоренко Б.З. Аэродинамика цепных завес цементных печей: экспериментальные данные // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород: Изд-во БГТУ. 2007. Ч. 2. С. 263–266.

10.Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 308 с.

11.Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.И. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 415 с.

12.Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.

13.Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 717 с.

14.Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

15.Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнов И.П. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 717 с.

Информация об авторах

Федоренко Борис Зиновьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики.

E-mail: bz9393@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Горлов Александр Семенович, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой высшей математики.

E-mail: belgoras@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Петрашев Владимир Иванович, старший преподаватель кафедры высшей математики.

E-mail: petrashev_v@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в апреле 2018 г.

© Федоренко Б.З., Горлов А.С., Петрашев В.И., 2018

B.Z. Fedorenko, A.S. Gorlov, V.I. Petrashev

MODELS OF AERODYNAMIC PROCESSES IN THE CHAIN VEILS OF CEMENT KILNS

This article deals with questions related to aerodynamics of the chain veils of the cement kilns by the wet production method: dust deposition and dust taking out from the cement kiln; turbulent boundary layer on the contact surface of the gas flows between chains and under chains in the chain veil; analysis of the experimental data on aerodynamics of the chain veils with the aim to refine the character of the aerodynamic processes. The estimation of the coefficient of dust deposition in the chain veil of the cement kiln is obtained, which allows to estimate the coefficient of dust deposition on the working kiln and to assess the significance of the constructive measures to increase the dust deposition in the chain veil and to decrease the taking out of dust. The presented model of the dust deposition in a chain veil is linear. If appropriate experimental data are available, the model can be refined taking into account the limitations of the dust deposition capability of the chain veil. An estimate of the turbulent boundary layer on the contact surface of the gas flows between the chains and under the chains in the chain veil is presented, which shows that the thickness of the boundary layer is small. This means that the chain veil of the cement kiln is sufficiently clear to distinguish gas flows between the chains and under the chains and that the throw of the gas through the boundary layer from the gas flow under the chains, enriched with dust, into the gas flow between the chains is minor to increase dust deposition on the chains. Experimental data on the aerodynamics of the chain veils and chains obtained with the participation of BSTU in these works are presented. On the basis of these data, the character of aerodynamic processes in the chain veils is specified. The analysis shows that it is possible to obtain sufficiently accurate estimates of the aerodynamic coefficients of resistance to the motion of gas in the chain veils, necessary for the construction of mathematical models of aerodynamics of the chain veils of the cement kilns.

Keywords: *the chain veil of a cement kiln, dust deposition and taking out the dust from a cement kiln, a turbulent boundary layer, aerodynamics of the chain veil of a cement kiln.*

REFERENCES

1. Fedorenko B.Z., Klassen V.K. Mathematical model of heat and mass transfer processes in the chain zone of a cement kiln Proceedings of the all-Union conf. "Fundamental research and new technologies in building materials science". Belgorod: BTIM. 1989, 113 p.
2. Fedorenko B.Z. Mathematical model of heat processes in the chain veils of rotary cement kilns. Cement, 1993, no. 3, pp. 18–22.
3. Fedorenko B.Z., Borzenkov A.V., Petrashev V.I. Complex of the programs for calculation of heat processes in the chain veils of rotary cement kilns. Cement, 1993, no. 3, pp. 17–18.
4. Fedorenko B.Z., Gorlov A.S. Mathematical modeling of motion control of the material in the zone of the chain veil of a rotating cement kiln. Resource and energy-saving technologies of building materials, products and structures: International conf. Belgorod: Publishing house BelSTABM, 1995, pp. 91–92.
5. Fedorenko B.Z. Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in the chain veils of cement kilns. News of higher educational institutions. Building, 2000, no. 10, pp. 129–135.
6. Fedorenko B.Z. Modeling, analysis and optimization of thermal processes in the chain veils of cement kilns. Modern problems of building materials: materials of the Seventh academic readings RAABS, Belgorod: Publishing house BelSTABM, 2001, part 2, pp. 347–359.
7. Fedorenko B.Z. Mathematical model of aerodynamics of a rotating cement kiln. Bulletin BSTU named after V.G. Shukhov, 2003, no. 6, pp. 401–421.
8. Fedorenko B.Z. Turbulent fluid motion: a refined Prandtl model. Bulletin BSTU named after V.G. Shukhov, 2005, no. 10, pp. 302–306.
9. Stepanov V.V., Chebotar A.A., Fedorenko B.Z. Aerodynamics of the chain veils of the cement kilns: experimental data. Science research, nanosystems and resource saving technologies in the building industry. International. science.- prakt. Conf.], Belgorod: Publishing house BSTU, 2007, part 2, pp. 263–266.
10. Klassen V.K. Technology and optimization of cement production. Belgorod: Publishing house of BSTU. 2012, 308 p.
11. Altshul A.D., Zhivotovsky L.S., Ivanov L.I. Hydraulics and aerodynamics. Moscow: Stroizdat. 1987, 415 p.
12. Loytzyansky L.G. Mechanics of liquid and gas. Moscow: Science. 1987, 840 p.
13. Schlichting G. Boundary layer theory. Moscow: Science. 1974, 717 p.
14. Kutateladze S.S. Heat Transfer and Hydrodynamic Resistance. Moscow: Energoatomizdat. 1990, 367 p.
15. Abramovich G.N., Girshovich T.A., Krashennnikov S.Yu., Sekundov A.N., Smirnov I.P. Theory of turbulent jets. Moscow: Science. 1984, 717 p.

Information about the author

Boris Z. Fedorenko, PhD, Assistant professor.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Aleksandr S. Gorlov, PhD, Assistant professor.
E-mail: belgoras@mail.ru
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Vladimir I. Petrashev, Senior lecturer.
E-mail: petrashev_v@mail.ru
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in April 2018

Для цитирования:

Федоренко Б.З., Горлов А.С., Петрашев В.И. Модели аэродинамических процессов в цепных завесах цементных печей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №7. С. 103–115. DOI: 10.12737/article_5b4f02c143dc21.96604314.

For citation:

Fedorenko B.Z., Gorlov A.S., Petrashev V.I. Models of aerodynamic processes in the chain veils of cement kilns. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no.7, pp. 103–115. DOI: 10.12737/article_5b4f02c143dc21.96604314.