

образование тесно связано с притоком влаги в мерзлую зону за счет миграции от УГВ. Слой образовался на всех без исключения точках наблюдения.

Динамичная и контрастная зима (1986-1987 г. и др.) с продолжительной оттепелью, (более 10-15 дней) способствовала формированию водонепроницаемого слоя преимущественно у поверхности почвы. Мощность слоя колебалась от 13 до 19 см. Образовался он также на всех без исключения точках наблюдения. В 1987-1988 г. и др., которые были гораздо теплее предшествующих лет бесснежная зима способствовала глубокому промерзанию почвы. Запас холода, оцениваемый по температуре почвы, был не ниже предшествующих лет., что характерно для предвесеннего состояния. Но такое кратковременное наступление холода не обеспечило значительного влагонакопления в зоне промерзшего слоя почвы, в то же время длительные оттепели, при положительной температуре осадков приносили дополнительное количество тепла в мерзлый слой. Совокупное взаимодействие этих факторов не способствовало сколь-нибудь значительному перераспределению и накоплению влаги в мерзлом слое почвы. Водонепроницаемый слой не образовался практически ни на одной из точек наблюдения. Исключение составляет точка 1, где локально повышена плотность почвы. Анализируя все варианты возникновения водонепроницаемого слоя на загоне, необходимо отметить, что формирование водонепроницаемого слоя происходило при влажности почвы менее $0,77W_{н.в.}$ и при температуре от -1°C и ниже.

Особенностью формирования водонепроницаемого слоя в бороздах является то, что в течение осенне-зимнего периода в них формируется климат отличный от загона. Оказывает влияние удвоенная и выше мощность снега в борозде по отношению к загону.

Из анализа таблицы следует, что водонепроницаемый слой в бороздах в снежные зимы формировался, но крайне незначительной мощностью: от двух до трех сантиметров при влажности этого периода не менее $0,95W_{н.в.}$ и температуре от нуля и ниже. Бесснежные зимы не способствовали форми-

рованию водонепроницаемого слоя. При низкой влажности верхнего слоя почвы температура его была выше критической. Однако в эти зимы, в отличие от предыдущих, в наиболее пониженных участках борозд сформировалась корка льда толщиной 1,5-2,0 см.

ВЫВОДЫ:

1. Микрорельеф оказывает существенное влияние на формирование пространственной пестроты водонепроницаемого слоя. При наличии снежного покрова в борозде водонепроницаемый слой практически не формировался, что подтверждает тот факт, что глубокие западины и борозды являются очагами повышенной инфильтрационной способности почвы.
2. Глубина промерзания почвы в западинах в 1.5-2 раза меньше чем на загонах.
3. Водонепроницаемый слой при частых и продолжительных оттепелях формируется у поверхности, а при их отсутствии на глубине 10-15 см.
4. Наличие водонепроницаемого слоя не препятствовало передвижению влаги и обусловлено структурной перестройкой почвы за счет замерзания инфильтрующейся воды в крупных порах и приводящей к дополнительной трещиноватости.
5. При прогнозах режима весеннего половодья в Белорусском Полесье необходимо учитывать выявленные нами закономерности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Калюжный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока Л.: Гидрометеиздат, 1981 – С. 159.
2. Шебеко В.Ф., Киселева А.И. Промерзание осушаемых болот // Тр. ин-та / БелНИИМВХ.-1976.-Вып.2.-С.151-161
3. Шехтер Ф.Н. Расчет глубины промерзания почвы и температуры мерзлой почвы. // Тр. ин-та / ГГО, 1958. Вып.22. – С.12-17

УДК 658.26

Северянин В.С.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГОРЕНИЯ В КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В последнее время большое внимание уделяется децентрализованному энергоснабжению, в котором энергогенерирующему оборудованию должны быть предъявлены повышенные требования, т.к. только высокие технико-экономические и экологические показатели элементов энергоснабжения позволяют достичь энергосберегающего эффекта. Применительно к котлам, преобразующим химический потенциал топлива в энтальпию теплоносителя, это – высокий коэффициент полезного действия (КПД) процесса горения и интенсивная теплопередача. Эти показатели обеспечивают низкие потери и низкие конструкционные затраты.

Высокий КПД котла достигается недопущением недожогов топлива и максимально возможным охлаждением продуктов сгорания. Такая цель легко достигается в котлах большой мощности, имеющих большой топочный объем и развитые поверхности нагрева. Чем меньше по габаритам топка, тем труднее организовать удовлетворительный топочный процесс. В малом факеле возрастает доля его внешней поверхности, усиливается охлаждающее действие топки, растут химические и механические недожоги.

Поэтому одной из причин недостаточного развития децентрализованного теплоснабжения являются трудности создания высокоэффективных огневых устройств для котлов малой мощности. Но только при высокоэффективном теплогенераторе малой мощности возможно энергосбережение, когда транспорт и распределение топлива намного эффективней, чем транспорт и распределение горячего теплоносителя. Следовательно, совершенствование топочного процесса в огневых аппаратах малой мощности является актуальной проблемой. Ее решение усложняется необходимостью использования не только высококачественного топлива, но и малореакционного, многозольного, влажного, смешанного, полифракционного. Интенсификация горения является необходимым условием совершенствования топочного процесса, т.к. увеличение скорости реагирования горючих с окислителем повышает надежность выгорания. Самым эффективным методом интенсификации горения в высокотемпературных условиях следует считать стопроцентное обеспечение кислородом поверхности горячей частицы топлива, т.е. улучшение обдувания топлива газовым воздушным потоком.

Северянин Виталий Степанович. Д.т.н., профессор каф. водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения БГТУ. Брестский государственный технический университет (БГТУ). Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Для неподвижной топливной частицы (например, находящейся в слое топлива) улучшение обдувания можно достичь усилением воздушного дутья, однако нельзя слишком увеличивать коэффициент избытка воздуха в топке. Частица, взвешенная в потоке газа (факел) обдувается значительно хуже, т.к. ее скорость примерно равна скорости потока. Поэтому необходим такой физический принцип, когда без увеличения количества воздуха можно улучшить обдувание топлива. Таким принципом, в частности, является создание пульсаций скорости в потоке. Эти пульсации могут быть автоколебательными или принудительными. В данной работе ведется анализ обдувания топлива синусоидально изменяющимся потоком применительно к малогабаритным огневым аппаратам.

Пусть задана скорость переменного потока газов:

$$W = W_{cp} + W_n \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \tau, \quad (1)$$

в котором находится частица, имеющая скорость V . Тогда скорость обдувания равна

$$Z = W - V. \quad (2)$$

Уравнение движения частицы [1]

$$m \cdot \frac{dV}{d\tau} = C \cdot \frac{\rho_z}{2} \cdot Z^2 \cdot S. \quad (3)$$

Приняв зависимость между коэффициентом аэродинамического сопротивления C и числом Рейнольдса в виде $C \cdot Re \approx const$ и введя понятие относительной скорости обдувания $\tilde{Z} = (W - V) / W_n$, выражение (3) приведем к виду

$$\frac{d\tilde{Z}}{dx} = \cos x - A\tilde{Z}, \quad (4)$$

решение которого

$$\tilde{Z} = [\sin x + A \cdot \cos x - A \cdot \exp(-A \cdot x)] / (1 + A^2). \quad (5)$$

Очень важной характеристикой движения является параметр увлечения, физически означающий соотношение аэродинамических и инерционных сил, показывающий интенсивность увлечения потоком находящейся в нем частицы

$$A = K \cdot \frac{\rho_z}{\rho_u} \cdot \frac{T \cdot v}{d^2}. \quad (6)$$

Чем меньше этот параметр, тем более неподвижна частица относительно потока газов. Входящие в A множители показывают влияние разных факторов на увлечение частицы потоком, т.е. на ее обдувание.

Максимальное значение \tilde{Z} в установившемся режиме определится при $d\tilde{Z} / d\tau = 0$

$$\tilde{Z}_{max} = 1 / (\sqrt{1 + A^2}) \quad (7)$$

для моментов времени, соответствующих

$$\operatorname{tg} x = 1 / A. \quad (8)$$

Скорость частицы

$$V / W_n = \tilde{V} = A^2 \cdot \sin x / (1 + A^2) - A \cdot \cos x / (1 + A^2), \quad (9)$$

а ее максимальное значение

$$\tilde{V}_{max} = A / (\sqrt{1 + A^2}) \quad (10)$$

в момент времени при

$$\operatorname{tg} x = -A. \quad (11)$$

Величины $\tilde{W}, \tilde{V}, \tilde{Z}$ в данный момент времени τ можно интерпретировать при помощи векторной диаграммы (рис. 1) без учета W_{cp} . Вокруг центра 0 вращается треугольник скоростей: 1 – вектор относительной амплитуды: $\tilde{W}_{max} = 1$; \tilde{V}_{max} – вектор максимальной относительной скорости частицы; \tilde{Z}_{max} – вектор максимальной относительной скорости обдувания. Последний вектор – разность первых двух. Треугольник вращается со скоростью $\omega = 2\pi/T$. Данный момент времени τ фиксируется углом $x = 2\pi \cdot \tau / T$ (т.е. это относительное время). Проекции этих векторов в момент τ на вертикальную ось дают мгновенное значение $\tilde{W}, \tilde{V}, \tilde{Z}$.

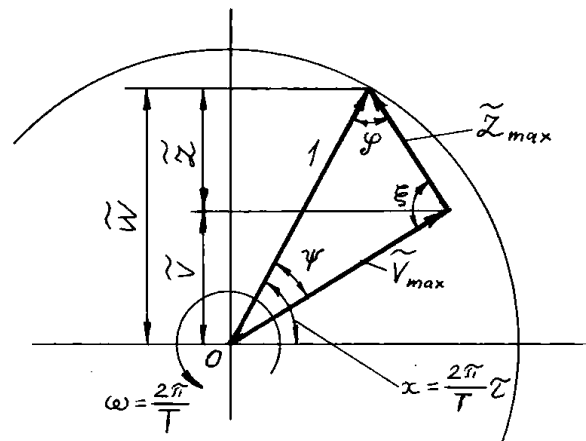


Рисунок - 1 Векторная диаграмма скоростей потока, частицы, обдувания

Сдвиг фаз между колебаниями скорости потока и скорости частицы ψ зависит от величины параметра увлечения

$$\psi = \arctg(-A) - \pi/2. \quad (12)$$

Он же влияет на сдвиг фаз между колебаниями скорости обдувания и колебаниями скорости потока

$$\varphi = \pi/2 - \arctg(1/A). \quad (13)$$

Величины ψ и φ определяются по (7...11) и тригонометрическим построениям, а угол $\xi = \pi - \varphi - \psi$.

Основной итог этих выкладок – сильная зависимость относительной скорости обдувания от параметра увлечения (рис. 2). То, что величина $\tilde{Z} \rightarrow 1$ означает, что частица практически неподвижна, она обдувается пульсациями потока; при $\tilde{Z} \rightarrow 0$ она движется вместе с потоком и не обдувается.

За время нахождения частицы топлива в топке она успевает претерпеть ряд воздействий от пульсаций

$$\frac{t}{T} = \frac{L}{W_{cp}} \cdot \frac{a}{b} = \frac{a \cdot L}{4L \cdot W_{cp}} = \frac{a}{4W_{cp}} \text{ раз}, \quad (14)$$

т.е. для реальных случаев только несколько раз колебания действуют на частицу (как показывают опыты, этого достаточно для эффективного выжигания топлива [2]).

В малогабаритных топках котлов малой мощности это обстоятельство требует особого рассмотрения с точки зрения длительности переходных процессов. Их можно охарактеризовать интенсивностью ослабления начальной скорости частицы

$$\lambda = (V_o - V_n) / (n \cdot V_o). \quad (15)$$

Если на данном x имеем $V_n = 0$, то

$$\lambda = 2 / n_o, \quad (16)$$

где n_o – номер периода, где $V_n = 0$, причем может быть $n_o < 1$.

Величина λ так же определяется параметром увлечения, увеличиваясь с ростом размера частицы, частоты пульсаций и скоростью газа W_{cp} (см. рис. 2).

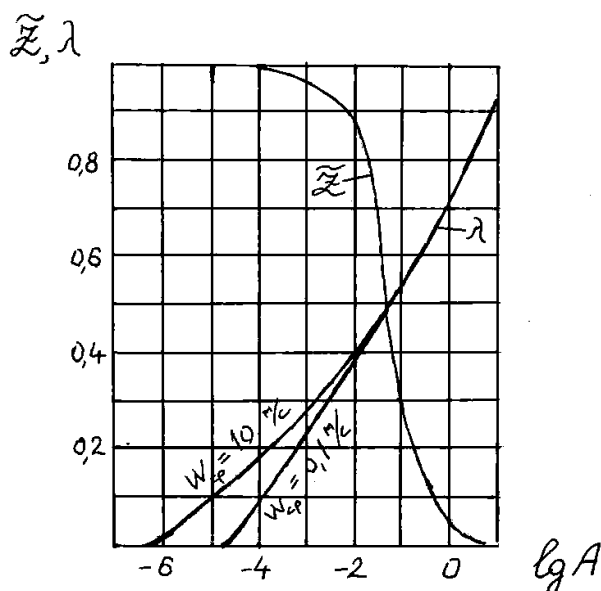


Рисунок 2 - Влияние параметра увлечения частицы A на обдувание \tilde{Z} и коэффициент ослабления начальной скорости λ .

Величина, обратная λ , показывает номер периода, где действие начальной скорости частицы или постоянной слагающей скорости потока W_{cp} прекращается. Тогда время, в течение которого эти скорости влияют на движение (обдувание) частицы

$$\tau^n = T / \lambda = 1 / (f \cdot \lambda), \quad (17)$$

т.е. в высокочастотном потоке частица быстрее перестает воспринимать постоянные слагающие скорости.

Если принять линейное уменьшение влияния начальной скорости, то эффективная скорость обдувания топлива

$$Z_{эфф} = (W_{cp} + V_o) \cdot \frac{\pi}{\omega \cdot \lambda \cdot \tau^n} + \tilde{Z} \cdot \frac{W_n}{\sqrt{2}}. \quad (18)$$

Для процесса большой длительности, при $\tau^n \gg \pi / \omega \cdot \lambda$, первым слагаемым можно пренебречь. Для процесса, скорость которого велика в начальный период, $Z_{эфф}$ определяется отдельно, для $\tau^n = 2\pi / \omega \cdot \lambda$, будет равно $(W_{cp} + V_o) / 2$.

Для малогабаритных топок, следовательно, переходной режим движения (обдувания) частицы характеризуется не только изменением амплитудно-фазовых соотношениям по колебаниям, но и изменением начальной скорости частицы топлива, введенной в топку, а так же постоянной составляющей скорости потока.

Для определения скорости горения далее используется эмпирическая зависимость [1]

$$\lg [K_S \cdot d / (C_{O_2} \cdot D)] = 0,5 [\lg Pe + \exp(-5,5 \cdot \lg Pe) - 1] \quad (19)$$

где диффузионный критерий Пекле $Pe = f(Z_{эфф})$.

Представленная выше схема интенсификации горения конструктивно реализуется согласно рис.3 при факельном сжигании мелкораспыленного твердого или жидкого топлива. Водогрейный котел малой мощности состоит из камеры пульсирующего горения [1], которая содержит устройство для подачи топлива и воздуха 1, камеру воспламенения 2 и спиральную резонансную трубу 3. Под выхлопом последней имеется поворотная камера 4, связанная с трубчатым теплообменником 5. Основные потоки сред (вода, воздух, топливо, продукты сгорания) показаны стрелками. Интенсификация горения происходит в резонансной трубе, где в течение времени (14), включающего и (17), на частицы топлива действуют пульсации потока (1), создавая обдувание (18), вызывая ускоренное выгорание (19). Такой котел целесообразно использовать в децентрализованном теплоснабжении благодаря высоким КПД сжигания, теплообмена, малым габаритам и затратам энергии на собственные нужды, отсутствию вредных выбросов.

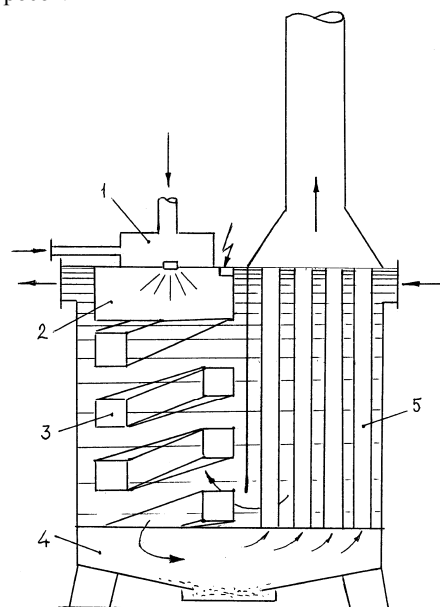


Рисунок 3 - Схема водогрейного котла малой мощности

Обозначения:

- W – скорость газа (воздуха, продуктов сгорания),
- W_{cp} – среднерасходная скорость газа,
- W_n – амплитуда пульсаций скорости газа,
- τ – текущее время,
- T – период пульсации,
- f – частота пульсаций,
- ω – угловая частота пульсаций,
- V – скорость частицы в потоке газа,
- Z – скорость обдувания частицы в потоке газа,
- m – масса частицы,
- d – размер (диаметр) частицы,
- ρ_z, ρ_c – плотности газа и частицы,

C – коэффициент аэродинамического сопротивления,
 S – мидель частицы,
 A – параметр увлечения,
 x – безразмерное время,
 ν – коэффициент кинематической вязкости,
 K – численный коэффициент,
 ψ, φ, ξ – углы треугольника скоростей,
 a – скорость звука,
 t – время горения,
 b – длина волны,
 L – длина факела,
 λ – коэффициент ослабления начальной скорости,
 V_0 – начальная скорость частицы,
 n – номер периода колебаний,

τ^n – время переходного процесса,
 K_S – поверхностная скорость горения топлива,
 C_{O_2} – содержание кислорода в потоке газа,
 D – коэффициент диффузии,
 Pe – число Пекле,
 \sim – знак относительной величины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попов В.А., Северянин В.С., Аввакумов А.М., Лысков В.Я., Щелоков Я.М. Технологическое пульсационное горение – М.: Энергоатомиздат. – 1993 – С. 320.
2. Северянин В.С., Федоров В.Г. Пульсирующее горение – новая технология топливоиспользования. Известия Белорусской инженерной академии. – № 2 – 1996. – С. 48-53.

УДК 621.182.57

Карницкий Н.Б.

НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ЭКРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫРАБОТКИ РАСЧЕТНОГО РЕСУРСА

Известно, что металл труб высокотемпературных поверхностей нагрева котлов работает в очень сложных условиях. С внешней стороны труб имеют место высокие температуры, агрессивные газы, неравномерный обогрев и золовые отложения. С внутренней – высокие давления рабочего тела, агрессивные газы, растворенные в воде, накипеобразователи.

Отставание темпов ввода новых генерирующих мощностей взамен выработавших свой ресурс ведет к прогрессирующему старению парка оборудования ТЭС. В табл. 1 приведены данные ОРГРЭС о котлах ЕЭС России, отработавших свыше 100 тыс. часов и более. Такая же тенденция характерна и для ТЭС РБ, на которых работают аналогичные котлы.

Таблица 1 - Доля котлов, отработавших свыше 100 тыс. часов (200 тыс. часов), %.

Параметры пара: давление, МПа/ температура, °С	Календарное время фиксации		
	01.01.94	01.01.95	01.01.96
14/560	70(12)	71(15,6)	74(18,5)
10/540	95(71)	около 100(80,7)	около 100(88)
10/510	100(100)	100(100)	100(100)

Из таблицы 1 видно, что весь парк котлов с параметрами пара 10МПа, $t_{не}=510^{\circ}C$ отработал свыше 200 тыс. часов и эксплуатируется в условиях повышенного риска. Данный вывод относится и к котлам с параметрами пара 10 МПа и 540°С.

Службой надежности ОРГРЭС были обследованы электростанции ЕЭС РФ и получены данные об остаточном парковом ресурсе котлов (табл. 2).

Приняв во внимание то обстоятельство, что котлы, установленные в один и тот же период на российских и белорусских ТЭС, работали в практически идентичных условиях, можно использовать информацию об их остаточном ресурсе применительно к однотипным котлам электростанций концерна “Белэнерго”.

Надежность котла определяется главным образом безаварийной работой его поверхностей нагрева, температура ме-

Таблица 2 - Сведения о среднем остаточном ресурсе котлов неблочных ТЭС

Тип котла	Год ввода в эксплуатацию в		Остаточный ресурс на 01.01.1996 г.
	РФ	РБ	
ТП-230	1951-60	1951-60	0,35-0,48
ТП-87, ТП-80	1961-70	1961-70	0,37-0,45
ПК-38	1962-67	1962-67	0,46-0,47
БКЗ-320-140	1971-76	1971-76	0,57-0,61
БКЗ-210-140	1971-73	1971-73	0,44-0,56
ТМ-84	1966-77	1963-77	0,38-0,51
ТГМП-114	1969-71	1969-71	0,42-0,46
ТГМП-324	1972-74	1972-74	0,63-0,72

талла которых не должна превышать предельного значения, установленного для конкретной марки стали.

Температура металла, в свою очередь, зависит от местоположения поверхности нагрева и условий ее работы. В топке котла ядро факела определяет зону повышенного обогрева, следовательно, и тепловую нагрузку радиационных и полурадационных поверхностей нагрева.

В целом по данным ОРГРЭС на электростанциях РФ порядка 34% отказов котлов была обусловлена повреждениями экранов топочных камер. При этом необходимы затраты не только на восстановительный ремонт, но и на последующий пуск котлов из холодного состояния (в основном на топливо). Так, по данным ОДУ концерна “Белэнерго” (1999г.) расход топлива на пуск котла из холодного состояния, т у.т., составляет

Тип котла	Расход топлива на пуск, т у.т.
БКЗ-420	140 41-45
БКЗ-320-140	39,2
БКЗ-210-140 Ф	35,0
ТГМ-84 Б, ТГМ-84	41-45
ТП-87	41
ТП-230	32

Выбор стратегии использования оборудования за пределами расчетного срока службы требует проведения специ-

Карницкий Никлой Борисович. Профессор, д.т.н., зав. каф. "Тепловые электрические станции" БГПА. Белорусская государственная политехническая академия (БГПА). Беларусь, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.