

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-

Таблица 3 - Основные причины отказов, вызванных повреждениями поверхностей нагрева котлов ТЭС РФ с параметрами пара 14 МПа, 560°C (1993/1994//1995 гг.)

| Котел | Кол-во котлов, имевших отказы | Общее число отказов | Число отказов из-за повреждений | | | |
|----------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|---------|
| | | | Экономайзера | Испарительных экранов | Пароперегревателя | Прочие |
| ТМ-84 | 13/7//8 | 33/11//14 | 17/6//4 | 3/1//2 | 9/4//7 | 4/-//1 |
| ТГМ-84 | 48/32//41 | 100/46//72 | 25/16//19 | 6/2//6 | 54/25//41 | 15/3//6 |
| ТП-80 | 3/5//6 | 6/10//12 | 1/4//2 | 2/2//4 | 3/4//6 | -/-//- |
| ТП-87 | 6/10//16 | 9/12//26 | -/2//3 | 2/3//7 | 6/7//14 | 1/7//2 |
| БКЗ-210-140 | 57/23//41 | 220/41//75 | 23/9//4 | 54/6//13 | 134/19//50 | 9/7//8 |
| БКЗ-320-140 | 8/9//8 | 13/13//10 | 1/1//2 | 4/5//3 | 6/7//5 | 2/-//- |
| БКЗ-320-140ГМ | 2/5//7 | 4/8//10 | 2/1//1 | 1/3//- | 1/3//6 | -/1//3 |
| БКЗ-420-140 | 27/13//23 | 86/34//53 | 11/6//11 | 17/13//14 | 55/11//22 | 3/4//6 |
| БКЗ-420-140НГМ | 13/11//11 | 38/22//22 | 11/4//5 | 5/1//- | 20/14//14 | 2/3//3 |

альных технико-экономических исследований. В условиях нехватки информации и знаний о процессах развития повреждений, приводящих к отказам, необходимо дальнейшее накопление экспериментального материала, который бы позволили выявить корреляции между нагрузкой и степенью истощения металлом запаса прочности. При этом нагрузку могут интерпретировать через такие исследуемые факторы, как температура и напряжение, что в дальнейшем использовано нами.

Известно, что падающие тепловые потоки формируют отраженные (Q_{omp}), а также воспринятые ($Q_{воспр}$) нагреваемой рабочей средой тепловые потоки. Уровень $Q_{воспр}$ пропорционален величине $q_{над}$, а температура стенки загрязненной экранной трубы, в свою очередь, зависит от величины $Q_{воспр}$.

Температура загрязненной стенки экранной трубы T_3 является определяющей в надежности данной поверхности нагрева котла и в произвольной точке окружности определяется по формуле [1,2]

$$T_3 = T_0 + (q_{над} \cdot \varphi_{\Sigma} \cdot a - 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \varphi_{\Sigma} \cdot a \cdot T_3^4) \epsilon, (1)$$

где T_0 – температура нагреваемой среды, К;

φ_{Σ} – результирующий угловой коэффициент;

a – степень черноты топки;

ϵ – коэффициент загрязнения.

В формуле (1) первый член выражения в скобках представляет собой теплоту, поглощенную от прямого излучения факела, второй – отраженную от обмуровки котла. В современных котлах шаги экранных труб S настолько малы, что доля теплоты, отраженной от обмуровки, невелика, и ею можно пренебречь.

Тогда выражение (1) с учетом высказанного допущения преобразуется к виду

$$T_3 = T_0 + q_{над} \cdot \varphi_{\Sigma} \cdot a \cdot \epsilon. (2)$$

В [3] определена погрешность измерения температуры стенки экранной трубы в зависимости от уровня тепловых потоков q , коэффициента теплоотдачи α и температуры среды T_{cp} . Показано превалирующее значение величины плотности теплового потока через стенку, а значение α и T_{cp} на 1-2 порядка ниже. В конечном итоге температура стенок экранных труб, а также иных радиационных поверхностей нагрева определяется уровнем $q_{над}$ и является одним из критериев надежности [3]. Согласно [4] для радиационных пароперегревателей при величине коэффициента теплоотдачи к пару $3,5 \div 4,6$ кВт/(м²·град) в зоне максимумов теплового потока разность температур “пар—стенка” достигает примерно 100°C с кратковременным повышением до 125°C. С учетом термического сопротивления стенки, достигающего 10-

15град/мм, в зоне максимальных тепловых потоков температура наружных слоев металла длительно превышает температуру пара почти на 150°C и кратковременно на 200°C. Положение максимума тепловых потоков на испарительных поверхностях нагрева не остается постоянным и определяется режимными факторами. Повышенные, неравномерно распределенные падающие тепловые потоки в топке могут вызвать чрезмерный перегрев труб, что скажется на надежности работы котлов в целом. Расчеты показывают, что прочностные характеристики металла снижаются при этом на 6,5 – 11,3%.

В таблице 3 приведена структура отказов из-за повреждений поверхностей нагрева котлов электростанций РФ с параметрами пара 14 МПа и 560°C. Из 100 отказов котлов ТГМ-84 в 1993 году 6 остановов были вызваны нарушениями в испарительных экранах, из 220 отказов котлов БКЗ-210-140 каждый четвертый отказ вызван неудовлетворительной работой испарительных экранов (54 отказа). Характерной причиной отмеченных отказов явился локальный перегрев металла из-за повышенной тепловой разверки, вызванной, как правило, неравномерным распределением падающих тепловых потоков в топке котлов.

Интенсификация теплообмена и повышение теплонапряжения в топке котлов приводят к необходимости более тщательного рассмотрения вопросов, связанных с нестационарными режимами работы оборудования, пульсациями температур, особенностями формирования факела новыми горелочными устройствами.

Тепловые потоки на поверхностях топки пропорциональны структуре изотерм, что позволяет сформулировать мероприятия по повышению экономичности и надежности работы топки (например, путем уменьшения наружных отложений на экранах, исключения газовой коррозии, устранения нарушений газодинамики собственно топки, горелок и т.п.).

Тепловой поток, воспринимаемый экранными поверхностями нагрева, является одним из наиболее важных параметров, определяющих надежность работы котла. Надежность работы радиационной части пароперегревателя также определяется локальными тепловыми потоками, причем здесь большее значение имеет схема работающих горелок и положение факела в топке. Неравномерные тепловые потоки могут вызвать местный перегрев металла из-за омывания факелом труб, разрыхления и выпучивания в сторону топки отдельных труб. Максимумы локальных тепловых потоков распространяются на ограниченную поверхность, не дают существенного парообразования или перегрева пара, но вызывают местный перегрев металла.

С использованием метода регрессионного анализа (МРА) и квази-D-оптимального плана эксперимента получена зависимость распределения $q_{над}$ при настенной компоновке горелок на котлах среднего давления вида

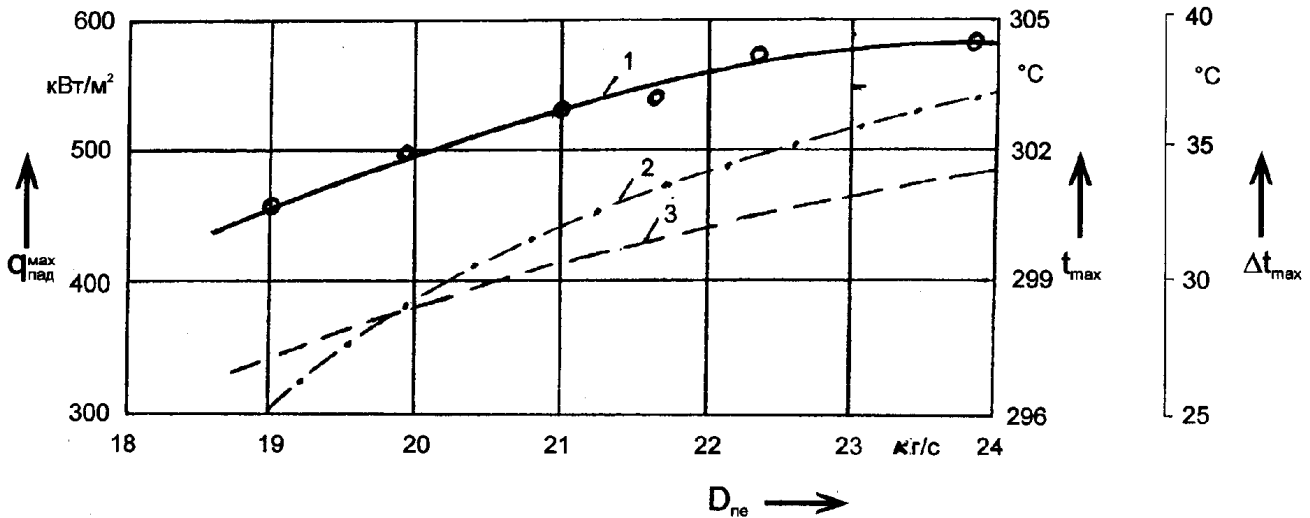


Рисунок 1 - Распределение измеренных максимальных тепловых потоков, расчетных температур и температурных перепадов при сжигании мазута в горелочном котле паропроизводительностью 23,6 кг/с в зависимости от нагрузки:

1. падающие тепловые потоки;
2. температуры внешней стенки экранной трубы;
3. перепад температур внешней и внутренней стенок экранной трубы.

$$q_{пад} = 0,068q_v^2 - 20,53q_v - 2100\alpha_{nn}''^2 + 5040\alpha_{nn}'' - 3727\bar{H}'^2 + 5075\bar{H}' - 2544, \quad \text{кВт/м}^2 \quad (3)$$

Соответственно, при подовой компоновке

$$q_{пад} = 0,012q_v^2 - 1,170q_v - 248\bar{H}'^2 + 499\bar{H}' - 3,110q_v \cdot \bar{H}' + 55, \quad \text{кВт/м}^2 \quad (4)$$

где q_v – теплонапряжение в топке, кВт/м³; α_{nn}'' – коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем; \bar{H}' – относительная высота топки.

Расчетные значения допустимых напряжений металла экранных труб σ , рассчитанных по методике [5] показали, что их уровень при подовой компоновке горелок ниже на 22% по сравнению с настенной.

Для получения обобщенной регрессионной модели, описывающей распределение $q_{пад}$ по высоте топки котла среднего давления с циклонными предтопками, был использован план эксперимента B_4 . В качестве определяющих факторов были выбраны $D_{не}$, α_{nn}'' , r , \bar{H}' . Получены уравнения регрессии (5, 6).

$$q_{пад} = 82D_{не} - 1,8D_{не}^2 - 30708\alpha_{nn}'' + 14120\alpha_{nn}''^2 + 307\bar{H}' - 290\bar{H}'^2 + 6,10\bar{H}' \cdot r - 4,5r + 15988, \quad \text{кВт/м}^2 \quad (5)$$

$$q_{пад} = 1,3D_{не}^2 - 48,2D_{не} + 7160\alpha_{nn}''^2 - 15906\alpha_{nn}'' - 851\bar{H}'^2 + 1181\bar{H}' - 0,16r^2 - 23,8r + 0,18D_{не} \cdot r + 5,35\bar{H}' \cdot r + 16,4\alpha_{nn}'' \cdot r + 9116, \quad \text{кВт/м}^2 \quad (6)$$

где $D_{не}$ – нагрузка котла, кг/с; r – степень рециркуляции, %.

Как отмечалось выше, распределение падающих тепловых потоков по высоте топки котлов неравномерное, причем максимальное значение, наблюдаемое в области размещения горелок, превосходит среднее в 2-3 раза. Максимальным падающим потокам соответствуют наибольшие температуры и

напряжения стенок труб радиационных экранов. Последние два параметра важны для оценки надежности работы котлоагрегата, поскольку порядка 55% их отказов связаны с нарушениями, возникающими в радиационных и полурadiационных поверхностях нагрева.

С использованием методики [5] были рассчитаны максимальные температуры и напряжения стенок труб радиационных поверхностей нагрева котлов.

Анализ литературных источников показывает, что максимальная температура стенки наблюдается в области максимальных падающих потоков, причем ее величина не зависит от закона изменения падающих потоков, а определяется его наибольшим значением. Общеизвестно, что при кратности циркуляции, равной 2-3, наступает ухудшенный режим теплообмена и экранные трубы будут перегреваться. Кроме того, в диапазоне докритических параметров потока максимальная температура и температурный перепад на стенке, обращенной к топке, практически не зависят от скорости движения пароводяной смеси и кратности циркуляции, а последний — и от давления. Вид топлива и способ сжигания (горелочный, циклонный) влияют на максимальную температуру только через уровень падающих тепловых потоков.

На рисунке 1 показана зависимость распределения максимальных падающих тепловых потоков, измеренных в топке газомазутного горелочного котла паропроизводительностью 25 кг/с. Диапазон изменения нагрузок 19,0-23,6 кг/с (76-94,4% номинальной). С повышением нагрузки с 20 до 23 кг/с наблюдается рост $q_{пад}^{max}$ на 85 кВт/м², или на 14%. Соответственно расчетные максимальная температура и температурный напор возрастают на 4 °С.

В конечном итоге неравномерность $q_{пад}$ приводит к изменению максимальных напряжений в металле труб [6]. Лобовая поверхность трубы, обращенная в топку, имеет температуру t_l значительно большую, чем тыльная часть t_s . Согласно [7] даже незначительный слой натрубных со стороны газов отложений способствует возрастанию температуры их поверхности до значений, близких к температуре факела. Разность между температурой факела и температурой поверхности гладкотрубных экранов, обращенных в топку, составляет 250 - 400 °С и более. Следует отметить, что наибольшая температура металла наблюдается в лобовой части экранной тру-

Таблица 4 - Исходные данные для расчета $D_{n+э}$

| Показатели работы | Коэффициент готовности котла, исходя из нормативной наработки на от-каз $T_o=6000$ ч и време-ни восстановления $T_g=24$ ч, K_{zom} | | Уровень падающих тепловых потоков $q_{над}$, кВт/м ² , в топке мазутного котла с | | Потери теплоты на пуск котла после простоя в ре-монте, q_n % /7/ | |
|--|--|--------|--|-----------------------------------|--|-------|
| | | | настенной ком-поновкой горелок (ф-ла 3) | циклонными предтопками (ф-лы 5,6) | | |
| Показатели рабо-ты | 0,996 | 0,9999 | 600 | 280 | 25 | 0 |
| Числовые отметки на шкале желательности | 0,20 | 0,999 | 0,20 | 0,999 | 0,20 | 0,999 |
| Значение пара-метра оптимиза-ции по безразмер-ной шкале, q_i | $-2449+2458 \cdot K_{zom}$ | | $13,35-0,023 q_{над}$ | | $6,9-0,295 q_n$ | |

бы со стороны топки, поскольку локальный коэффициент облученности равен 1. В то же время температура тыльной части экранов практически равна температуре среды, так как уровень отраженных тепловых потоков от обмуровки незначи-телен.

Высокий уровень тепловых потоков и образующийся слой накипи на внутренних поверхностях экранных труб способст-вуют возникновению термоусталостных явлений, образова-нию поперечных трещин глубиной от сотых долей миллиметра до 2 мм и более. Как уже отмечалось, наибольшие колеба-ния температур в металле наблюдаются на лобовой стороне труб, расположенных в районе горелочных устройств. Со-гласно [8] можно выделить два предельных по условиям кор-розии уровня падающих тепловых потоков.

При $q_{над} = 280$ кВт/м² скорость высокотемпературной коррозии металла определится из выражения

$$C_{кор} = 4,2 - 2,033 \frac{\bar{t}}{100} + 0,245 \left(\frac{\bar{t}}{100} \right)^2, \text{ мм/1000ч} \quad (7)$$

а при $q_{над} = 600$ кВт/м²

$$C_{кор} = -174,78 + 116 \left(\frac{\bar{t}}{100} \right) - 25,666 \left(\frac{\bar{t}}{100} \right)^2 + 1,893 \left(\frac{\bar{t}}{100} \right)^3, \text{ мм/1000ч} \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) \bar{t} – средневзвешенная температу-ра, учитывающая переменность температурного режима в процессе эксплуатации. Автор [8] установил, что при боль-ших потоках значение \bar{t} достигает 530 °С, а скорость корро-зии в 3 раза выше, чем при малых $q_{над}$.

Таким образом, уровень тепловых потоков определяет температуру металла и скорость протекающих при этом кор-розионных процессов в металле экранных труб.

Воспользовавшись уже имеющимися экспериментальными данными, получим зависимость, связывающую показатели надежности экранной системы котла с его экономичностью.

Исходные данные для решения этой задачи приведены в таблице 4.

В результате отработки данных таблицы 4 получим обоб-

щенную функцию полезности «надежность–экономичность»

$$D_{n+э} = \exp \left\{ -\frac{1}{3} \left[\exp(-2449 + 2458 K_{zom}) + \exp(13,35 - 0,023 q_{над}) + \exp(6,9 - 0,259 q_n) \right] \right\} \quad (9)$$

ВЫВОДЫ

1. Анализ отказов I и II степени на котлах тепловых электро-станций показал, что более чем в половине случаев нару-шения приходится на испарительные и пароперегрева-тельные поверхности нагрева. Одной из причин этих по-вреждений является неравномерное распределение па-дающих тепловых потоков в топке.
2. На основе систематизации экспериментального материала и анализа физических процессов, протекающих в топке газомазутных котлов, получена обобщенная функция по-лезности, включающая в себя показатели надежности и экономичности котла. Показано, что надежность существ-венным образом зависит от коэффициента готовности и уровня тепловых потоков, а экономичность котла резко снижается с ростом $q_{над}$ и длительности восстановитель-ного периода в результате отказа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карасина Э.С. К вопросу об учете загрязнений радиаци-онных поверхностей нагрева// Теплоэнергетика. - 1968. - №6. - С. 14-18.
2. Жихар Г.И., Карницкий Н.Б. Расчет температуры загряз-ненной радиационной поверхности нагрева// Научные и прикладные проблемы энергетики: Сб.ст. - Мн.: Вышэй-шая школа, 1980. - Вып. 7. - С. 69-73.
3. А. И. Тесленко, В.М. Диденко, Е.Т. Тертыйная. Анализ систематической погрешности контактного измерения температуры стенки трубы поверхностей нагрева в топках котлов// Промышленная теплотехника. -1992. - Т. 14. - №1-3. - С. 47-50.
4. Внуков А.К. Надежность и экономичность котлов для газа и мазута. - М.-Л.: Энергия, 1966.-368 с.
5. Карницкий Н.Б., Сорокин В.В. Расчетно-экспериментальное определение температур стенок эк-ранных поверхностей нагрева котлов// Вісник Ук-

раїнського Будинку економічних науково-технічних знань - 1998. - № 8. - С. 17-20.
 6. Цвынар Л. Пуск паровых котлов. - М.: Энергоиздат, 1981. - 312 с.

7. Елизаров П.П. Эксплуатация котельных установок высокого давления на электростанциях. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 400 с.
 8. Янко П.И. О предельно допустимой температуре металла труб НРЧ газомазутных котлов СКД// Энергетика и электрификация. - 1981. - № 4. - С. 8-10.

УДК 621.311

Новосельцев В.Г.

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ В СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Существенным недостатком систем централизованного теплоснабжения являются потери теплоты при ее транспортировании по теплосетям. Например, за 1993 год по Брестским тепловым сетям потери теплоты составили такое количество, что на ее производство необходимо 16200 т.у.т. (это составляет месячный расход топлива для трех теплоисточников Брестских тепловых сетей), а с учетом внутриквартальных распределительных тепловых сетей около 25000 т.у.т. (данные из доклада директора Брестских тепловых сетей Н.П. Борушко на научно-технической конференции в БПИ в 1994 году).

Летом 1999 года Белэнергоремналадка провела испытания Брестских тепловых сетей на тепловые потери. Испытаниям подверглись подающие и обратные теплопроводы некоторых тепломагистралей от ТЭЦ диаметрами 500 мм общей протяженностью более 12 км. Испытываемые тепломагистралы проложены в основном подземной прокладкой в переходных каналах с изоляцией из минеральной ваты, а также имеются участки теплопроводов из предизолированных труб (материал изоляции полиуретановый пенопласт), проложенных бесканальной прокладкой.

Последовательность технологических операций при проведении испытаний была следующей:

- Сборка схемы циркуляции сетевой воды при испытаниях с отключением ответвлений;
 - Установка и поддержание до конца испытаний расхода сетевой воды на выводе ТЭЦ 250 м³/ч и давление в обратном теплопроводе 2 кг/см²;
 - Установка температуры прямой сетевой воды 70 °С;
 - Поддержание постоянной температуры (прогрев теплосети) с 14 часов 14.06.99 до 10 часов 16.06.99;
 - С начала и до конца испытаний проводилась запись показаний термометров в точках наблюдения.
- Тепловые потери подсчитывались по формуле

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где G – расход сетевой воды в теплосети, т/ч;

c – теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

ΔT – разница между температурами теплоносителя в начале и в конце участка, К (°С).

Условия проведения испытаний следующие: средняя температура окружающей труборпровод среды 14.3°С, температура на выводе ТЭЦ 72°С в прямом теплопроводе и 60.1°С в обратном теплопроводе. Падение температуры теплоносителя 11.9°С. Суммарные теплотери в прямом и обратном теплопроводах 3260300 Вт теплоты (вышеуказанные данные взяты из технического отчета по испытаниям тепловых сетей), на выработку которой необходимо следующее количество топлива

$$V = \frac{Q_{mn}}{Q_n^p \cdot \eta_k} = \frac{3260300 \cdot 3600}{4.19 \cdot 1000 \cdot 7000 \cdot 0.8} = 500 \text{ кг у.т./ч}, \quad (2)$$

где Q_{mn} – суммарные теплотери в прямом и обратном теплопроводах, Вт;

Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг у.т.;

η_k – КПД котла.

При применении в качестве топлива природного газа на выработку такого количества теплоты расходуется столько топлива, что его стоимость составит в ценах на сентябрь 2000 года

$$C = \frac{3260300 \cdot 3600}{4.19 \cdot 1000 \cdot 8000 \cdot 0.8} \cdot 0.069 = 30.2 \text{ \$/ч}.$$

Так как исследования проводились в летнее время, а в зимнее время потери увеличиваются из-за увеличения разности температур, то необходимо оценить, каковы потери теплоты при транспорте теплоносителя по теплосетям в зимнее время. Рассмотрим отношение тепловых потерь в зимний период к потерям в летний период

$$\frac{Q_z}{Q_l} = \frac{k_z \cdot F \cdot \Delta t_z}{k_l \cdot F \cdot \Delta t_l} = \frac{k_z \cdot \Delta t_z}{k_l \cdot \Delta t_l}, \quad (3)$$

где Q_l, Q_z – тепловые потери при транспорте теплоты в летний и зимний период соответственно, Вт;

F – площадь теплообмена, м²;

$\Delta t_l, \Delta t_z$ – разность температуры теплоносителя и окружающей среды в летний и зимний период соответственно, °С;

k_l, k_z – коэффициенты теплопередачи теплоты от теплоносителя в сети к наружному воздуху в летний и зимний период соответственно, Вт/(м²·К).

Коэффициенты теплопередачи в летний и зимний период можно описать следующими зависимостями [1]:

$$k_l = m \cdot \Delta t_l^n, \quad (4)$$

$$k_z = m \cdot \Delta t_z^n, \quad (5)$$

где m, n – экспериментальные коэффициенты.

Для примерной оценки определим экспериментальные коэффициенты, используя данные, полученные в результате исследования тепловых сетей (табл. 1).

После подставления значений в формулу для тепловых потерь

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (6)$$

и проведения соответствующих вычислений получаем для участков 1 и 2: $k_1=1.52, k_2=1.19$.