



Рис. 6. Влияние длительности цикла выдержки на полное время охлаждения при асимметричной схеме

Для снижения полного времени охлаждения необходимо использовать либо асимметричную схему охлаждения при минимальном времени цикла, равном 5 минутам, либо симметричную схему с временем охлаждения – 30 минут и временем выдержки – 5 минут.

#### Список использованных источников

1. Прибытков И.А. Теплообмен излучением: уч. пособие / И.А. Прибытков. – М. МИСИС. 2008. – 98 с.
2. Теплотехника металлургического производства. Т.2 / Под редакцией В.А. Кривандина. – М. МИСИС, 2002. – 736 с.
3. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
4. Гусовский В.Л. Методики расчета нагревательных и термических печей / В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.

УДК 62–533.6

**Е. В. Приходько, А. С. Никифоров**

Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова,  
г. Павлодар, Казахстан

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

#### Аннотация

В статье рассмотрена надёжность работы высокотемпературных агрегатов в рамках надёжности работы его футеровки. Определение надёжности тепловой работы футеровки и прогнозирование её дальнейшей работы без допущения превышения эксплуатационных пределов, осуществляется различными способами. Специфика эксплуатации футеровок высокотемпературных агрегатов ограничивает применение способов теплового контроля их работы. Авторами статьи для этих целей предложен способ определения теплового состояния футеровки высокотемпературного агрегата, который позволяет с достаточной точностью определять температурные поля в футеровке высокотемпературного агрегата с минимальным нарушением целостности футеровки. Его применение в лабораторных условиях показало его достаточную точность и простоту.

Для определения надёжности работы высокотемпературных агрегатов были определены наиболее значимые факторы, влияющие на продолжительность эксплуатации.

Это – значения величин температурных напряжений (как сжатия, так и растяжения), превышающих допустимые; точка перехода из зоны сжатия в зону действия растягивающих усилий и продолжительность действия критических напряжений (то есть напряжений, превышающих допустимый уровень для данного материала). Далее были разработаны критерии для оценки надёжности работы футеровки, включающий три вышеперечисленных фактора, а также создана методика по определению данного фактора для футеровки высокотемпературных агрегатов при их эксплуатации. Критерий надёжности является суммарным показателем для всех моментов времени тепловой работы высокотемпературного агрегата, при которых температурные напряжения превышают предел прочности. Методика включает определение теплового состояния футеровки по разработанному способу и вычисление критерия надёжности. С учётом статистики по выводу высокотемпературных агрегатов в ремонт по неудовлетворительному состоянию футеровки производится определение минимально допустимых критериев для оценки надёжности работы футеровки, при достижении которых необходимо выводить высокотемпературный агрегат в ремонт при дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: футеровка, надёжность, высокотемпературный агрегат, тепловой контроль.

### Abstract

*In the article, there was considered the reliability of the operation of high-temperature aggregates in the context of the reliability of the operation of its lining. The determination of the reliability of the thermal operation of the lining and prediction of its further operation without exceeding the operational limits is carried out in various ways. The specificity of the lining of high-temperature units limits the application of methods of thermal control of their operation. Thus, the authors of the article proposed for these purposes a method for determining the thermal state of the lining of a high-temperature aggregate, which allows to determine with sufficient accuracy the temperature fields in the lining of a high-temperature aggregate with minimal disruption of the lining integrity. Its use in laboratory conditions showed its sufficient accuracy and simplicity.*

*In order to determine the reliability of high-temperature units, there were determined the most significant factors affecting the service life. These are the values of the temperature stresses (both compression and expansion) that exceed the permissible values; the point of transition from the compression zone to the zone of action of the tensile forces and the duration of the action of the critical stresses (that is, the stresses exceeding the permissible level for the given material). Further, a criterion was developed for evaluating the reliability of the lining operation, which includes the three factors listed above, and a procedure was developed to determine this factor for the lining of high-temperature units during their operation. The reliability criterion is the total index for all the time points of the thermal operation of a high-temperature aggregate, under which the temperature stresses exceed the ultimate strength. The procedure involves determining the thermal state of the lining according to the developed method and calculating the reliability criterion. Taking into account the statistics on removing high-temperature aggregates for repair because of an unsatisfactory state of the lining, there was determined the minimum permissible criteria for evaluating the reliability of the lining operation, when it is necessary to remove the high-temperature unit for repair in the future operation.*

*Key words: lining, reliability, high-temperature unit, thermal control.*

В настоящее время вопросам оценки надёжности и остаточного ресурса работы высокотемпературных агрегатов уделяется значительное внимание. Оценка остаточного ресурса тесно связана с понятием работоспособности оборудования. При определении надёжности работы оборудования для прогноза уровня безопасности часто используется метод имитационного моделирования. Такие работы включают, например, прогнозирование остаточного ресурса оборудования нефтехимических производств от степени износа [1]. Использование имитационного моделирования позволяет перейти от детерминированного прогноза остаточного ресурса к вероятностной его оценке, что является исходной

информацией для принятия мотивированных решений для повышения надежности и безопасности судовых дизелей за счет обоснованного назначения сроков и режимов эксплуатации.

Работа высокотемпературного агрегата во многом определяется состоянием футеровки (теплового ограждения). На многих агрегатах футеровка является не только частью, определяющей продолжительность эксплуатационного периода агрегата до ремонта, но и самой затратной (в финансовом плане) составляющей. Поэтому в данной статье ограничимся рассмотрением надёжности работы высокотемпературного агрегата в рамках надёжности работы его футеровки.

В настоящее время тепловая работа футеровок контролируется различными способами. Определение реального состояния футеровки в рамках контроля тепловой работы и прогнозирование её дальнейшей работы, без допущения превышения эксплуатационных пределов, осуществляется различными способами.

Один из основных видов контроля футеровок высокотемпературных агрегатов для определения надёжности работы агрегатов – тепловой вид контроля [2]. Методы теплового вида контроля основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термометрическим чувствительным элементом (термопарой, болометром, термоиндикатором и т.д.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста лучистости и др.) в параметры электрического или другого сигнала и его передаче на регистрирующий прибор.

Для контроля применяют пассивные и активные методы, при которых объект не подвергают (или подвергают) воздействию от внешнего источника энергии.

В целом тепловой вид контроля позволяет получить следующие данные:

- обнаружения отклонений от заданной формы и геометрических размеров объектов контроля.
- для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности в объектах контроля (трещин, пористости, расслоений, инородных включений);
- обнаружения изменений в структуре и физико-химических свойствах объектов контроля (неоднородность структуры, теплопроводность структуры, теплоемкость и коэффициент излучения).

Наличие дефектных участков определяют по увеличению температуры на поверхности агрегатов, что позволяет судить о состоянии футеровки и проводить ремонтные работы до наступления аварийных ситуаций (например, протечки металла для металлургических машин).

Акустико-эмиссионный контроль широко применяют для интегральной оценки технического состояния и оценки степени опасности имеющихся дефектов различного оборудования, и в первую очередь емкостного: сосудов, трубопроводов и резервуаров различного назначения. На ультразвуковую дефектоскопию (УЗД) в мировой практике приходится в настоящее время 60 % всего объема неразрушающего контроля [3]. При использовании ультразвукового неразрушающего контроля практически решаются те же задачи технологического контроля, что и при использовании теплового вида контроля.

Значительными недостатками применения многих из рассмотренных видов контроля является отсутствие возможности проводить их в процессе эксплуатации агрегата, т.е. без его останова, что очень важно при эксплуатации высокотемпературных агрегатов.

Авторами статьи разработан способ определения теплового состояния футеровки высокотемпературного агрегата, который позволяет с достаточной точностью определять температурные поля в футеровки высокотемпературного агрегата с минимальным нарушением целостности футеровки. Измерения в лабораторных условиях достоверность его применения.

Для дальнейшего рассмотрения обозначим  $\sigma^{90\%}$  – допустимый предел прочности материала, равный 90 % пределу прочности этого материала (как для растяжения, так и для сжатия). Данная величина выбрана нами, исходя из того, что величина возникающих напряжений при различных режимах разогрева или охлаждения высокотемпературных агрегатов лежит в пределах от 75 до 80 % от нормы, а также из недопущения условия равенства возникающих напряжений и предела прочности (момент начала разрушения).

Для определения надёжности работы высокотемпературных агрегатов необходимо определить наиболее значимые факторы, влияющие на продолжительность эксплуатации. Это, в первую очередь, значения величин температурных напряжений (как сжатия, так и растяжения), превышающих допустимые. Именно это является важнейшим определяющим фактором, так как при отсутствии критических напряжений, превышающих допустимый уровень, разрушение футеровки, вследствие температурного воздействия, не происходит.

Таким образом, определяющим фактором будет являться величина предела прочности материала, соотнесенная к максимальному значению напряжений, возникающему в футеровке высокотемпературного агрегата в рассматриваемом сечении, т.е. величиной отношения:

$$\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{max}} = \kappa_3, \quad (1)$$

где  $\kappa_3$  будет по логике являться коэффициентом запаса прочности. Чем больше величина отношения для конкретного огнеупорного материала, тем он менее чувствителен к термоударам. Исходя из теоретических соображений его величина не может превышать 1, а величина равная 1, определяет момент разрушения кладки.

С другой стороны данное отношение не устанавливает температурных областей, в которых материал наиболее уязвим к воздействию термических напряжений или способен к их релаксации. В связи с этим требуется ввести еще один параметр, который позволил бы детерминировать наиболее опасную зону для разрушения кладки.

При воздействии на поверхность изделия тепловой нагрузки максимальные растягивающие напряжения формируются на определенном расстоянии от поверхности. Величина этого расстояния обусловлена формой и размером, а также температурным полем изделия.

Следовательно, таким параметром может служить точка перехода из зоны сжатия в зону действия растягивающих усилий с координатой  $x_r$ : чем меньше зона растяжения, тем меньше вероятность разрушения футеровки. Введем относительную координату условной границы перехода, обозначив ее через коэффициент  $\beta$ :

$$\beta = \frac{x_r}{H}, \quad (2)$$

где  $H$  – толщина футеровки.

Ну, и наконец, на разрушение футеровки влияет продолжительность действия критических напряжений, которое определим фактором  $\tau$ . Действие остальных факторов – агрессивного действия среды, качества применяемых материалов и проводимых работ, уровень вибрации и др. можно принять постоянными для данного агрегата при постоянных условиях работы.

Таким образом, критерий для оценки надёжности работы футеровки для зоны растяжения можно представить в виде следующей функциональной зависимости:

$$P_{\phi}^{pac} = f(\kappa_3; \beta; \tau) \quad (3)$$

Значение фактора относительной координаты условной границы перехода ( $\beta$ ) можно объединить со значением растягивающих напряжений определяя их среднеинтегральным значением температурных напряжений в зоне их превышения над допустимым пределом  $\sigma^{90\%}$ . Таким образом, критерий для оценки надёжности работы футеровки в зоне растяжения можно представить в виде (например, для растяжения):

$$P_{\phi}^{pac} = \sum_{i=1}^{\tau} \frac{\sigma_{pac}^{90\%}}{(\sigma_{pac})_i \leq \sigma_{pac}^{90\%}} \cdot (X_{pac})_i, \quad (4)$$

$$\int_{(\sigma_{pac})_i \geq \sigma_{pac}^{90\%}} \sigma_p(\tau) d\tau$$

где  $\sigma_{pac}^{90\%}$  – допустимый предел прочности материала на расширение, равный 90 % предела прочности на расширение этого материала;

$(\sigma_{pac})_i$  – возникающие температурные напряжения в момент времени  $i$ ;

$(X_{pac})_i$  – длина зоны растяжения в момент времени  $i$ , в которой возникающие температурные напряжения  $(\sigma_{pac})_i$  превышают допустимый предел прочности материала на расширение  $\sigma_{pac}^{90\%}$ ;

$\tau$  – время тепловой работы высокотемпературного агрегата.

Таким образом, методика определения надёжности работы высокотемпературного агрегата (по надёжности футеровки) будет выглядеть следующим образом. Любым известным способом находят распределение температур по сечению футеровки во время работы высокотемпературного агрегата (например, [4]). Далее находят возникающие напряжения в зоне растяжения  $\sigma_p$  и сжатия  $\sigma_c$  по формуле:

$$\sigma = -\frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot (T_{cp} - T_i) \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения, (1/°C);

$T_{cp}$  – средняя температура огнеупорного слоя, °C;

$T_i$  – температура точки, в которой производится расчёт температурного напряжения, °C;

$E$  – модуль упругости материала, МПа

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Затем находят критерии для оценки надёжности работы футеровки по приведённой выше формуле.

То есть критерий является суммарным показателем для всех моментов времени тепловой работы высокотемпературного агрегата (от  $i=1$  до  $\tau$ ), при которых температурные напряжения превышают предел прочности.

На основании данных по температурным состояниям футеровки за предыдущее время работы производится подсчёт критериев для оценки надёжности работы футеровки (для растяжения и сжатия). С учётом статистики по выводу высокотемпературных агрегатов в ремонт по неудовлетворительному состоянию футеровки производится определение минимально допустимых критериев для оценки надёжности работы футеровки, при достижении которых необходимо выводить высокотемпературный агрегат в ремонт при дальнейшей эксплуатации.

### Список использованных источников

1. РД 26.260.004–91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. 1992.
2. ГОСТ Р 56511–2015. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования.
3. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. – М.: Высш. шк., 2006. – 279 с.
4. Инновационный патент № 30372 Республика Казахстан, МПК G01K 13/00 опубл. 15.09.2015, бюл. № 9.