

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 539.319

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТЕРМОНАГРУЖЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПО ДАННЫМ НАТУРНОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ**

© 2019 г. С. В. Маслов\*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия**\*e-mail: maslovsv@inbox.ru*

Поступила в редакцию 07.03.2018 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

Рассмотрена методология построения систем мониторинга напряженно-деформированного состояния энергетического оборудования, основанная на функциональных связях и регрессионных зависимостях напряженного состояния от измеряемых параметров. Предложен алгоритмы построения системы мониторинга напряженно-деформированного состояния для элементов оборудования, подверженных нестационарным воздействиям теплоносителя с переменной температурой. Рассмотрены результаты применения алгоритма для исследования напряженно-деформированного состояния патрубков корпусных элементов энергоустановок в условия эксплуатации.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, энергетические установки, расчетно-экспериментальный метод, натурная тензометрия

DOI: 10.1134/S0235711919010139

Фундаментальные и прикладные исследования, проводимые в Институте машиноведения (ИМАШ РАН) в области создания научно-методической базы анализа и обеспечения прочности и безопасности эксплуатации ответственных энергетических установок, непосредственно связаны с изучением процессов нагружения и повреждения конструкций в условиях экстремальных физико-механических воздействий, агрессивных и коррозионных сред [1, 2]. Одним из направлений исследований является физическое и математическое моделирование процессов нагружения, построение комплексных моделей, критериев [3], методов анализа и нормирования прочности, живучести, безопасности и ресурса конструкций при повторных силовых и неизотермических тепловых воздействиях [4]. Проектный ресурс технических систем содержит запасы, связанные с отличием реальной истории нагружения от оценок, основанных на максимально возможных воздействиях повреждающих факторов эксплуатационного нагружения. Несмотря на изменения, произошедшие в возможностях численных методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) сложных конструкций, их применение не всегда учитывает реальную историю нагружения оборудования из-за невозможности прогнозирования многовариантных процессов изменения температур и скоростей потоков теплоносителей, не предусмотренных при проектировании изменений механических нагрузок и сложных сочетаний факторов нагружения. Для построения реальной истории нагружения создаются системы мониторинга, основанные на измерениях параметров состояния энергоустановки, по которым определяются возникающие напряжения, деформации, перемещения узлов и аг-



**Рис. 1.** Алгоритм реализации системы диагностического контроля НДС, основанной на расчетно-экспериментальных методах и процедурах.

регатов. К настоящему времени с участием ИМАШ РАН разработаны варианты систем контроля НДС, использующие сигналы датчиков штатных систем контроля, результаты пуско-наладочных измерений (ПНИ) и результаты расчетного анализа, базирующиеся на применении различных алгоритмов расчета напряжений (рис. 1).

В настоящее время наметилась тенденция к созданию систем эксплуатационного контроля напряженного состояния, прочности и ресурса, в которых в качестве регистрируемых параметров можно использовать сигналы штатных датчиков контроля состояния (давлений, температур и др.) [5] и получаемые в оперативном режиме значения вычисленных по заранее предусмотренным алгоритмам значений напряжений, температур [6, 7], накопленных повреждений в опасных точках, недоступных для прямых измерений (на внутренних поверхностях, в зонах концентрации и т.п.).

Алгоритмы сбора, обработки и архивации информации параметров состояния, НДС и (или) накопленные повреждения в опасных точках, могут основываться на методологических подходах, использующих методы экспериментальной механики [8], математической статистики [9] и предварительно полученные результаты [10] измерений и моделирования процессов нагружения. Рассмотрим три методологических подхода к решению поставленной задачи.

**Традиционный подход** заключается в непосредственном использовании результатов измерений, полученных на начальном этапе пуско-наладки и эксплуатации, для уточнения значений возникающих напряжений и последующей оценке повреждений, накапливаемых при фактически реализованной истории нагружения. Используя методы термометрирования и тензометрирования, по результатам которых проводится сравнение экспериментально полученных результатов с расчетными [11, 12], вносят

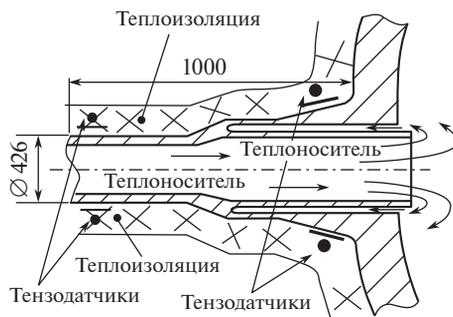
уточнения в алгоритмы и методики расчетов и оценивают уровень повреждаемости узлов конструкции. Эта процедура весьма трудоемка и не всегда позволяет учесть накопленные повреждения для всего срока эксплуатации, но позволяет выделить наиболее опасные режимы, вносящие значимый вклад в повреждение металла конструкций. Путем внесения конструктивных изменений или изменений технологического регламента исключается реализация опасных режимов, что позволяет избежать повреждений оборудования. Измерение напряжений представляется возможным в основном на наружных поверхностях оборудования, что требует применения специальных алгоритмов пересчета на наиболее нагруженные точки, расположенные внутри конструкции. Тензометрия проводится в условиях высоких температур, что сказывается на погрешности результатов. Поэтому использование данного метода эффективно для уточнения повреждаемости при неопределенных или произвольно меняющихся граничных условиях, расчетное задание которых затруднительно. В результате строятся “портреты нагружения” ответственных элементов конструкции для различных режимов эксплуатации, формируется история нагружения и определяется уточненный остаточный ресурс.

В настоящее время **базовым подходом** является использование данных экспериментального контроля и расчетных моделей [13–15], связывающих регистрируемые параметры нагружения (давления, температуры) с НДС в контрольных точках. Признанным удачным решением являются системы “САКОР” [13], применяемые ОКБ “Гидропресс” для контроля накопленного усталостного повреждения и остаточного ресурса оборудования РУ ВВЭР-1000. Принципиальным отличием алгоритмов САКОР является реализация принципа регистрации в режиме реального времени показаний штатных датчиков состояния и расчет с их использованием параметров НДС, накопленных повреждений в опасных точках и остаточного ресурса. Принимается расчетная модель зависимости напряжений в опасных точках от параметров состояния энергоустановки, характеризующая обобщенной структурной формулой [5]

$$\begin{aligned}
 (\sigma_L) = & D + A_j p_j + S U_i u_i(t) + B1_m T_m^{cp}(t) + B2_m M X_m^T(t) + \\
 & + B3_m M Y_m^T(t) + B4_k \Theta_k(t) + \int_{t-t_{max_k}}^t \sigma b_k(t-\tau) \frac{\partial \Theta_k(\tau)}{\partial \tau} d\tau,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $(\sigma_L)$  – искомые функции изменения приведенных напряжений в точках;  $D$  – напряжения от веса, затяга, монтажа и остаточные напряжения;  $A_j p_j$  – напряжения от давления теплоносителей;  $S U_i u_i$  – напряжения, вызванные взаимными перемещениями элементов конструкции;  $B1_m T_m^{cp}$ ,  $B2_m M X_m^T(t)$ ,  $B3_m M Y_m^T(t)$  – напряжения, вызванные компенсацией температурного расширения и стратификацией (возникновением градиента температуры по высоте сечения) теплоносителя;  $B4_k \Theta_k(t)$  – местные напряжения при стационарном нагреве;  $t$  – время;  $\sigma b_k(t-\tau)$  – базовая функция интеграла Дюамеля, характеризующая напряжения от изменения температуры;  $\Theta_k(\tau)$  – температуры теплоносителей.

При определении коэффициентов и функций связи составляющих напряжений в опасных точках с измеренными параметрами используются данные, полученные при пуско-наладочных измерениях (от тензометрических и дополнительных датчиков). В связи с ограниченностью объема штатного экспериментального контроля, невозможностью точной аппроксимации распределений температур по длинам и сечениям трубопроводов и отсутствием данных по температурам внутренних поверхностей, уточнение алгоритмов расчета по формулам (1) имеет ограничения. Сигналы датчиков температур наружных поверхностей запаздывают по отношению к изменениям температуры теплоносителя, а при импульсных изменениях и термопульсациях имеют



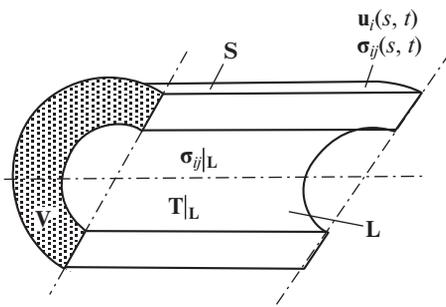
**Рис. 2.** Типичная геометрия патрубка подвода теплоносителя к корпусному элементу (на примере патрубка подпитки ПГВ-1000).

сглаженный характер, что снижает точность расчетов. Это осложняет определение слагаемого формулы (1), связанного с возникновением напряжений при наличии градиентов температур по толщинам стенок. Для определения НДС требуется применение комбинированных алгоритмов, основанных на решении прямых и обратных задач теплопроводности и термоупругости [6–8].

Другим **возможным принципом** построения систем мониторинга НДС является предложенный в ИМАШ РАН (рис. 1) вероятностный подход, при котором используются регрессионные зависимости напряжений в контрольных точках от ограниченного набора параметров, полученные по данным пуско-наладочных измерений [9]. Применение подобных алгоритмов оправдано, если другие способы определения НДС использовать невозможно (при отсутствии экспериментальных данных). Достоверность и точность полученных этим способом результатов зависит от объема расчетных и экспериментальных данных и точности алгоритмов, использованных при создании регрессионных моделей. Таким образом, при использовании любого из трех рассмотренных алгоритмов необходимо использовать математические модели, связывающие контролируемые параметры с НДС в опасных точках. Наибольшую сложность представляет создание подобных моделей для точек, расположенных в зонах геометрических особенностей на внутренних поверхностях контуров циркуляции теплоносителя. Для определения НДС для таких точек, в особенности для режимов с быстрыми изменениями температур теплоносителя, необходимо использовать комбинированные методы анализа с учетом результатов тензометрических измерений (полученных для доступных точек конструкции) и вычислительных алгоритмов, основанных на решении прямых и обратных задач экспериментальной механики. Разработанный алгоритм создания расчетной модели НДС для типичного элемента конструкции реакторов ВВЭР – патрубка соединения трубопровода с корпусным элементом приведен на рис. 2.

Показанные на рис. 2 средства экспериментального контроля (тензорезисторы) снабжены также датчиками температуры (термопарами) и используются на этапе пуско-наладочных испытаний. В связи с тем, что скорость потока теплоносителя внутри контура высока (около 5 м/с), изменение его температуры из-за передачи тепла к внутренней поверхности трубопровода и патрубка незначительно и составляет менее 1°C. Поэтому температура теплоносителя в трубопроводе и патрубке принимается постоянной вдоль продольной оси, но изменяющейся во времени со скоростью до 3–5°C/с.

В соответствии с разработанным алгоритмом, определение НДС проводится из решения прямой задачи термоупругости, для которой в качестве исходных данных необходимо задание полей температур для выделенного фрагмента конструкции. Опреде-



**Рис. 3.** Постановка обратной задачи термоупругости для определения нагруженности внутренней поверхности по измеренным значениям напряжений на наружной поверхности трубопровода.

ление полей температур по результатам теоретического анализа тепловых процессов не дает приемлемых для расчета НДС результатов, так как реально осуществляемые эксплуатационные режимы могут отличаться от расчетных. Поэтому в качестве исходных данных при решении задачи определения полей температур целесообразно использовать полученные экспериментально функции изменения температуры теплоносителя и коэффициенты теплоотдачи, используемые при задании граничных условий теплообмена третьего рода. Альтернативой подобному алгоритму было бы непосредственное задание температур внутренних поверхностей конструкции, но необходимые для этого экспериментальные данные отсутствуют, так как в штатных системах контроля датчики температур внутренних поверхностей оборудования отсутствуют. Для восстановления параметров теплового потока на внутренней поверхности возможно применение нескольких алгоритмов. Один из них основан на решении обратной задачи теории теплопроводности с использованием в качестве исходных данных измеренных функций изменения температуры наружной поверхности цилиндрических участков трубопроводов. Решаемое при этом интегральное уравнение Вольтера первого рода является неустойчивым относительно погрешностей исходных данных, так как флуктуации тепловых потоков от теплоносителя вызывают неотличимые друг от друга изменения температуры наружной поверхности. Кроме того, в результате эффекта теплового запаздывания возникает неопределенность в “привязке” процесса к шкале времени. В связи с этим усложняется задача суммирования НДС, вызываемых различными нагружающими факторами. Проведенные численные эксперименты [7, 11] показали, что разные варианты решения обратной задачи приводят к заметно различающимся результатам, что свидетельствует о наличии значительных погрешностей.

Альтернативным методом восстановления параметров теплового потока на внутренней поверхности фрагмента конструкции является решение обратной задачи термоупругости, основанной на использовании в качестве исходных данных измеренных функций изменения напряжений на наружной поверхности теплоизолированного цилиндрического участка трубопровода.

Постановка задачи в этом случае показана на рис. 3.  $S$  – фрагмент поверхности с известными из измерений значениями вектора перемещений, тензора напряжений, температуры (тепловой поток отсутствует, т.к. поверхность теплоизолирована);  $L$  – фрагмент поверхности, на котором восстанавливаются значения напряжений, температуры, теплового потока. Искомой величиной являются напряжения на внутренней поверхности  $\sigma_{i,m}(t)$ , но на первом этапе ставится задача определения функции изменения температуры внутренней поверхности  $T_L$ . Наружная поверхность трубопровода доступна для измерений, поэтому методом тензометрии на ней определяются компо-

ненты тензора напряжений  $\sigma_l$  и  $\sigma_m$  (окружные и меридиональные напряжения) и температура поверхности  $T^*(t)$  как функции времени. Задача рассматривается как несвязанная (деформации не влияют на поле температур) и включает уравнения термоупругости и теплопроводности

$$\mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} = \frac{\alpha_l E}{1 - 2\nu} \text{grad } T, \quad \chi \nabla^2 T = \partial T / \partial t$$

при граничных условиях  $u_i|_S = u_i^*(s, t)$ ,  $T|_S = T^*(s, t)$ ,  $s \in S$ ,  $t > 0$ , где  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений;  $\lambda$ ,  $\mu$  – упругие постоянные Ламе;  $E$  и  $\nu$  – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона;  $\chi$  – теплопроводность (здесь не зависящая от температуры). Если  $T^*(s, t) \neq 0$ , то можно решить дополнительно задачу с граничными условиями  $T|_S = T^*(s, t)$ ; и  $T|_L = 0$ , откуда определяются перемещения  $u_i^0(s, t)$ , которые вычитаются из измеренных  $u_i^*(s, t) - u_i^0(s, t)$ .

Так как методами натурной тензометрии определяются компоненты тензора напряжений, то удобнее записать уравнения для напряжений

$$\int_0^t d\tau \int_L G_{ij}^0(s, x, t - \tau) T(x, \tau) dL(x) = \sigma_{ij}^*(s, t) - \sigma_{ij}^0(s, t), \quad (2)$$

где  $G_{ij}^0(s, x, t - \tau)$  – функции напряжений Грина.

Решение обратной задачи, т.е. определение температурного поля  $T(x, \tau)$  из уравнений (2) возможно в случае, если компоненты тензора напряжений вызваны только нагружением рассматриваемого фрагмента трубы радиальным температурным полем и не содержат составляющих, связанных с другими нагружающими факторами. Это означает, что из измеренных напряжений необходимо исключить напряжения, вызванные давлением в контуре, и напряжения, вызванные самокомпенсацией трубопроводов.

Учет составляющих, связанных с внутренним давлением в контуре, не вызывает затруднений [11, 12]. Если внутреннее давление в контуре меняется, необходима синхронизация моментов измерения давления и напряжений или внесение поправок, связанных с несинхронностью измерений.

Для исключения составляющих, вызванных самокомпенсацией, можно использовать дополнительные средства измерений, расположенные в нескольких сечениях трубопровода. На рис. 4 показана схема экспериментального определения напряжений, связанных с дополнительным нагружением трубопровода изгибающими моментами и осевыми нагрузками при переходных температурных режимах. Расположенные в сечении А – А тензорезисторы позволяют определить величину и направление действующего в сечении изгибающего момента и исключить из рассмотрения напряжения, связанные с изгибом трубопровода. Тензодатчики, расположенные на участке ниже упругой опоры, позволяют оценить осевую силу в сечении А – А из решения системы

$$N_1 x_1 - N_2 x_2 = M_{x1}, \quad N_1(x_1 + b) - N_2(x_2 + b) = M_{x2}.$$

Отсюда значение осевой силы равно  $(N_1 - N_2) = (M_{x2} - M_{x1})/b$ .

Заметим, что при использовании данных, полученных методами тензометрии, необходимо оценить величину случайной погрешности, связанной с особенностями проведения эксперимента. При значительных разбросах данных решение обратной задачи может оказаться неопределенным.

Функции изменения температуры внутренней поверхности, полученные в результате реализации приведенного алгоритма, относятся к регулярному участку трубы, но

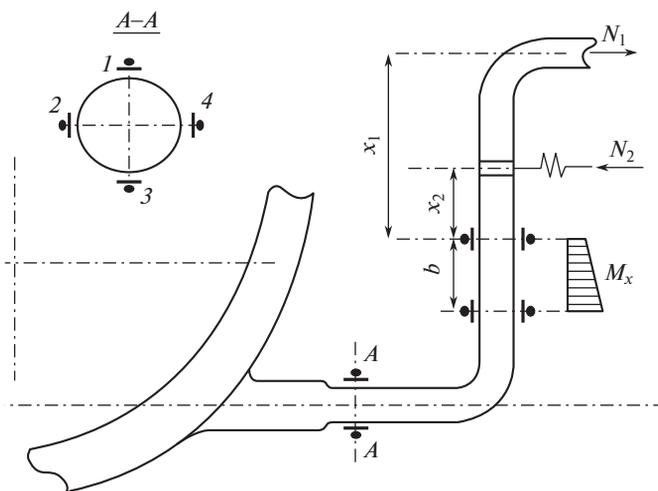


Рис. 4. Схема расположения измерительных точек системы натурной тензометрии для оценки изгибающих моментов и нормальных усилий в сечении А–А патрубка трубопровода.

не к патрубку, имеющему сложную геометрию и неравномерное поле температур внутренней поверхности. Поэтому необходимо по полученным функциям изменения температуры внутренней поверхности цилиндрического участка трубопровода определить тепловые параметры потока теплоносителя — температуру и коэффициент теплоотдачи к стенкам.

Для решения этой задачи временной отрезок теплового режима разбивается на малые временные интервалы и определяются отдельные (например, кусочно-линейные) решения для температуры теплоносителя на каждом временном отрезке. На нулевом итерационном шаге принимается минимальная величина диапазона значений коэффициента теплоотдачи (для воды можно принять  $5000 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$ ), в качестве начального условия принимается равномерное поле температуры. В качестве контрольного параметра на каждом временном шаге используются показания тензорезисторов и решение прямой задачи термоупругости для цилиндрической части. Процедура повторяется, находясь параметры потока теплоносителя, дающие наилучшее приближение расчетной температуры внутренней поверхности цилиндрической части к температуре, полученной из решения обратной задачи.

Рассмотренный алгоритм определения температурных полей для выделенного элемента содержит допущения, связанные с предположением постоянства теплофизических свойств в объеме и неизменности граничных условий теплообмена на всей внутренней поверхности выделенного фрагмента. В действительности, подобные допущения нуждаются в проверке, а поставленные граничные условия в уточнении. Критерием корректности принятых допущений является соответствие полученных расчетных результатов экспериментальным данным, полученным методом тензометрии для точек, расположенных наиболее близко к зонам максимальных напряжений.

Апробация предложенного алгоритма выполнена на примере определения НДС зоны стыковки патрубка аварийной питательной воды парогенератора ПГВ-1000, для которого имеются экспериментальные данные и полученное численное решение с применением программного комплекса INVERSE [8]. На рис. 5 представлены результаты измерений напряжений и температур в зоне патрубка при режиме включения и последующего отключения аварийного питательного насоса. В результате возникно-

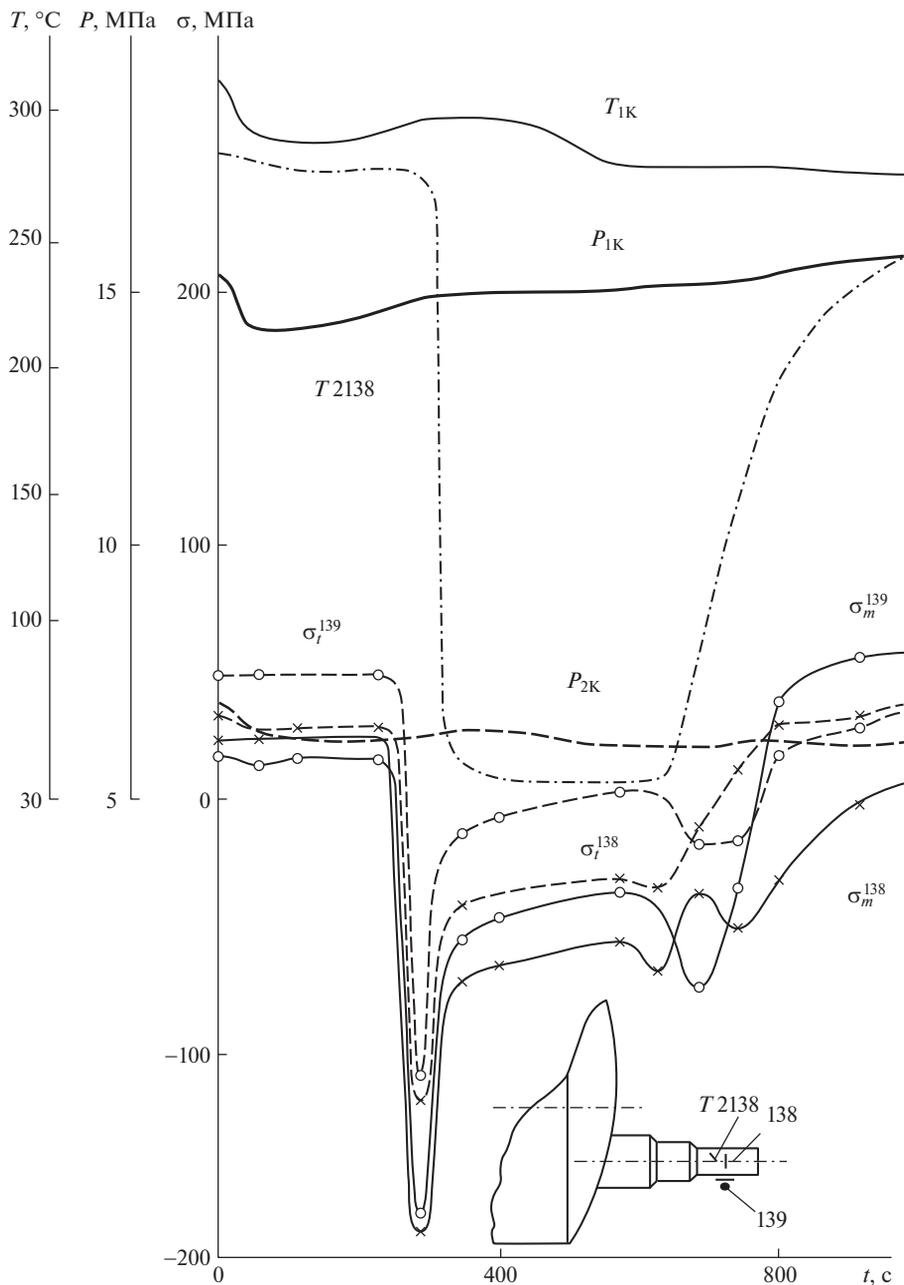


Рис. 5

вения в аварийном питательном трубопроводе потока холодного теплоносителя температуры самого трубопровода и зоны его стыковки с корпусом резко снижаются. Это сопровождается появлением напряжений самокомпенсации и местных температурных напряжений, вызванных разными скоростями охлаждения относительно тонкого трубопровода и более массивного корпуса парогенератора.

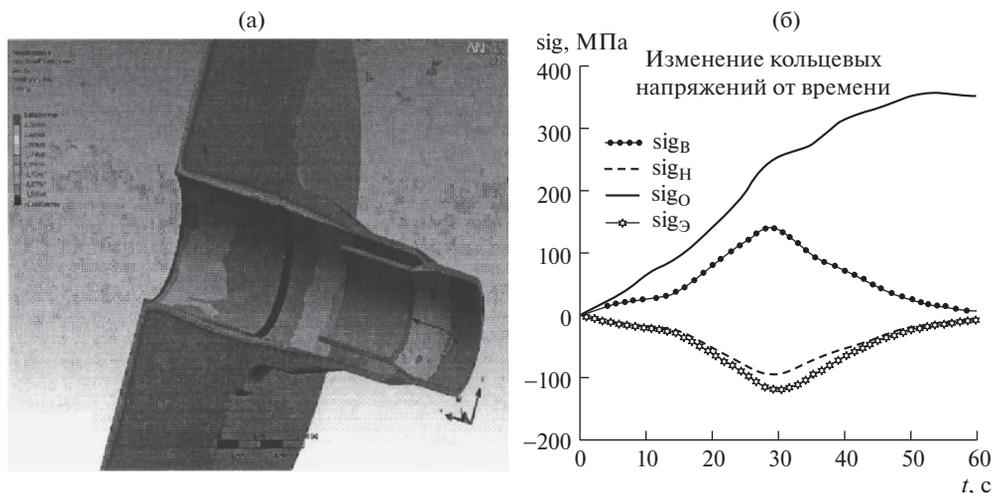


Рис. 6

Результаты применения предложенного расчетно-экспериментального алгоритма для определения НДС приведены на рис. 6. Теплоноситель кроме внутреннего объема корпуса попадает также в щелевой зазор между обечайкой патрубка и тепловым экраном (рис. 6а), при этом скорость потока в зазоре ниже, чем в основной трубе. При оценке “сверху” параметры теплового потока в щелевом зазоре принимаются теми же, что в основном трубопроводе, полученные напряжения в зонах концентрации оказываются выше возникающих в натурной конструкции. Задавая пониженные значения коэффициента теплоотдачи в зазоре, определяют значения, при которых расчетные напряжения соответствуют измеренным в зоне концентрации. Для оценки температурного состояния патрубка используется расчетное моделирование теплообмена по рассмотренному алгоритму в допущении осевой симметричности температурного поля. Задача решена в комплексе ANSYS, определены поля напряжений, близкие к полученным экспериментально (две нижние кривые на рис. 6б); несовпадение не превышает 7% от определяемых значений).

#### Выводы.

1. Методы мониторинга, основанные на рассмотренных принципах и расчетных алгоритмах, целесообразно использовать при создании систем комплексного диагностического контроля НДС и остаточного ресурса создаваемых энергоблоков нового поколения.

2. Алгоритм определения НДС элементов энергоустановок, подверженных нестационарным воздействиям теплоносителя, может быть построен на основе предложенного комбинированного экспериментально-расчетного алгоритма.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвиенко Ю.Г. Моделирование и критерии разрушения в современных проблемах прочности, живучести и безопасности машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 80–89.
2. Матвиенко Ю.Г. Двухпараметрическая механика разрушения в современных проблемах прочности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 37–46.

3. *Махутов Н.А.* Комплексная система расчетно-экспериментального определения условий и параметров предельных состояний // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1-1. С. 52–56.
4. *Махутов Н.А., Европин С.В., Чернявский А.О., Чернявский О.Ф.* Анализ напряженно-деформированного и предельного состояния конструкций при повторных неизотермических нагружениях // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 1. С. 112–118.
5. *Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пиминов В.А., Драгунов Ю.Г.* Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. М.: Наука, 2004.
6. *Фомин А.В., Михалев Ю.К.* Расчетно-экспериментальные методы в системах оперативной диагностики термонапряженности элементов машин и конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 3. С. 97–104.
7. *Маслов С.В., Салин А.Н.* Контроль НДС критически важных конструкций с применением расчетно-экспериментальных алгоритмов, основанных на использовании результатов тензо- и термометрии // Научные труды IV Междунар. научной конф. “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”. М., 2015. С. 164–168.
8. *Разумовский И.А., Чернятин А.С., Фомин А.В.* Развитие экспериментально-расчетных методов определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в ИМАШ РАН // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 10. С. 87–94.
9. *Тихонов С.Е.* Применение натурной тензометрии в системе контроля напряженно-деформированного состояния и ресурса энергетического оборудования // Экспериментальные исследования напряжений в конструкциях. М.: Наука, 1992.
10. *Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У.* Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2016. № 4. С. 44–54.
11. *Михалев Ю.К., Фомин А.В., Маслов С.В.* Натурные тензотермометрические исследования напряженно-деформированных состояний оборудования АЭС // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 5. С. 121–126.
12. *Махутов Н.А., Дайчик М.Л., Маслов С.В. и др.* Методы и результаты исследований напряженного состояния реакторной установки ВВЭР-1000 при эксплуатации / Междунар. центр научной и технич. информации. М.: Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 1992.
13. *Богачев А.В., Беркович В.Я., Семишкин В.П., Меркун А.В., Муравин Д.Б., Нагорный А.О.* Внедрение системы автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР) на этапе продления срока службы энергоблока // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2014. № 34. С. 76–83.
14. *Митенков Ф.М., Большухин М.А., Козин А.В., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Пахомов В.А., Пичков С.Н.* Технология эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем ЯЭУ // Проблемы прочности и пластичности. 2012. № 74. С. 068–077.
15. *Лякишева М.Д., Халутин А.А., Лякишев С.Л., Семишкин В.П., Богачев А.В.* Автоматизация расчета накопленного усталостного повреждения конструкции при циклическом и длительном циклическом нагружении // Тяжелое машиностроение. 2015. № 9. С. 18–23.