Расчет деформации и целостности топливных каналов РБМК при частичных разрывах РГК с использованием кода КАТРАН1

Новосельский О.Ю., Филинов В.Н. (ГУП НИКИЭТ, Москва)

Calculation of Deformation and Integrity of RBMK Pressure Tubes at DGH Partial Break Using KATRAN1 Code

O.Yu.Novoselsky & V.N.Filinov (NIKIET-ENTEK, Moscow)

Описание расчетной модели кода КАТРАН1

Аварии, связанные со значительным снижением расхода или всплеском мощности, в итоге приводят к нагреву труб ТК выше температуры начала вязкопластического деформирования при наличии существенного перепада давления на трубах каналов. Анализ таких аварий предполагает динамический расчет высокотемпературной деформации и разрушения канальных труб в пределах активной зоны.

Расчетный анализ поведения труб ТК при аварийном нагреве выполняется с использованием термомеханического кода КАТРАН1, предназначенного для расчета высокотемпературной деформации и разрушения труб топливных каналов РБМК [1]. КАТРАН1 решает осесимметричную задачу вязкопластического деформирования канальной трубы, нагруженной внутренним давлением в условиях однородного поля температур. Расчет скорости деформации канальных труб осуществляется с использованием экспериментально обоснованных зависимостей для скорости высокотемпературной ползучести сплава Zr+2,5%Nb.

В общем виде зависимости для скорости окружной деформации представлены в коде в двух температурных диапазонах в виде функций окружного напряжения и температуры с переменными значениями энергии активации ползучести:

для температурного диапазона 450-850 ^{o}C:

$$\xi_\theta = 1{,}3\cdot 10^{-5}\sigma_\theta^{9}\exp\left(-\frac{Q_1/R}{T_w}\right)+\frac{5{,}7\cdot 10^{7}\sigma_\theta^{1{,}8}\exp\left[-\left(Q_2/R\right)\big/T_w\right]}{\left[1+2\cdot 10^{10}\int\limits_{\tau_1}^{\tau}\exp\left[-\left(Q_3/R\right)\big/T_w\right]d\tau\right]^{0{,}42}}\;; \qquad (1)$$

для температурного диапазона 850-1200 ^{o}C:

$$\xi_\theta = 10{,}4\sigma_\theta^{3{,}3}\exp\left(-\frac{Q_4/R}{T_w}\right)+\frac{3{,}5\cdot 10^{4}\sigma_\theta^{1{,}4}\exp\left[-\left(Q_5/R\right)\big/T_w\right]}{1+274\int\limits_{\tau_2}^{\tau}\exp\left[-\left(Q_6/R\right)\big/T_w\right]\left(T_w-1105\right)^{3{,}72}d\tau}\;, \qquad (2)$$

где: σ_θ - окружное напряжение (МПа);
T_w - температура трубы ТК (К);
Q_i/R - приведенные значения энергии активации процесса ползучести (К),
(R - универсальная газовая постоянная);
τ_1 - время, при котором T_w=700 ^{o}C, τ_2 - время, при котором T_w=850 ^{o}C,
τ - время от начала процесса.

По мере раздутия трубы под действием давления теплоносителя выбираются зазоры в системе труба ТК - графитовые кольца - графитовые блоки. После образования

плотного контакта между трубой и графитом часть блоков графитовой колонны оказывается нагруженной внутренним давлением теплоносителя за вычетом реакции трубы. По достижении критического давления на внутренней поверхности одного или нескольких блоков происходит образование трещины или трещин в наиболее нагруженных сечениях. Дальнейшее распространение трещин по телу блоков происходит под действием раздувающейся трубы ТК. Скорость распространения трещин определяется динамикой температуры и напряженно-деформированного состояния канальной трубы и блоков, а также свойствами графита. Полное разрушение графитовых блоков произойдет при распространении трещин на всю глубину поперечного сечения.

Алгоритм расчета процесса образования и распространения трещин в графитовых блоках аварийного ТК, реализованный в коде КАТРАН1, включает в себя оценку возникновения трещины на внутренней поверхности блоков по предельному давлению и расчет эволюции поверхностной трещины в эквивалентном толстостенном цилиндре.

Выражение для минимального давления в ТК, приводящего образованию трещины на внутренней поверхности графитовых блоков с учетом действующих термических напряжений, выглядит следующим образом:

$$p_{\text{тр}} = \frac{\left(r_{\text{т,н}}^2 + r_{\text{т,в}}^2\right)\left\{R_m^p - \frac{\alpha E_{\text{гр}}}{(1-\mu)}\frac{\Delta T_{\text{б}}}{\Delta r_{\text{б}}}\left[\frac{2\left(r_{\text{б,н}}^3 - r_{\text{б,в}}^3\right)}{3\left(r_{\text{б,н}}^2 - r_{\text{б,в}}^2\right)} - r_{\text{б,в}}\right]\right\}}{2r_{\text{т,в}}^2\left(\frac{r_{\text{б,н}}^2 + r_{\text{б,в}}^2}{r_{\text{б,н}}^2 - r_{\text{б,в}}^2} + \nu\right)}, \tag{3}$$

где $\Delta T_{\text{б}}$- перепад температуры по толщине графитового блока,

$\Delta r_{\text{б}}=r_{\text{б,н}}-r_{\text{б,в}}$ толщина графитового блока (аппроксимирующего цилиндра),

α- коэффициент температурного расширения блочного графита,

$E_{\text{гр}}$- модуль упругости блочного графита,

μ- коэффициент Пуассона блочного графита,

p - давление в ТК,

$r_{\text{т,в}}$- внутренний радиус трубы ТК,

$r_{\text{т,н}}$- наружный радиус трубы ТК,

$r_{\text{б,в}}$- внутренний радиус графитового блока,

$r_{\text{б,н}}$- наружный радиус графитового блока,

$\nu = R_m^p / R_m^{сж}$,

R_m^p и $R_m^{сж}$ - соответственно предел прочности графита на растяжение и сжатие.

Расчеты показывают, что минимальное значение давления в ТК, приводящее к образованию трещин в блоках с учетом температурных напряжений, соответствует для упрочненного при облучении графита $p_{\text{тр}}$=4,8 МПа, для неупрочненного графита в состоянии поставки $p_{\text{тр}}$=3,6 МПа.

Алгоритм расчета эволюции поверхностной трещины в графитовом блоке базируется на расчете коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины при заданной схеме нагружения. На каждом расчетном временном шаге производится расчет текущего значения КИН по нормативной формуле для цилиндрических элементов, нагруженных внутренним давлением и температурными воздействиями:

$$K_{\text{I}} = \eta\left(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q\right)\sqrt{\pi \cdot a} / Q, \tag{4}$$

где η- коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений;
σ_p- составляющая напряжений растяжения;
σ_q- составляющая изгибных напряжений;
M_p=1+0,12(1-a/c);
M_q=1-0,64a/h;
a- глубина трещины;
c- полудлина трещины;
h- длина зоны действия положительных изгибных напряжений;
$Q = \sqrt{1 + 4{,}6(a/2c)^{1{,}65}}$.

Текущее значение K_I сравнивается с вязкостью разрушения K_{Ic} блочного графита. При превышении значением K_I критического значения K_{Ic} рассчитывается приращение глубины трещины на заданном временном шаге при скорости совместной деформации трубы и графитовых блоков. Скорость совместной деформации определяется по уравнениям ((1)-(2)) для трубы, нагруженной внутренним давлением за вычетом реакции блоков. Разрушение блоков постулируется при проникновении двух диаметрально противоположных трещин на заданную глубину.

После разрушения графитовых блоков рассчитывается дальнейшая деформация трубы до разрыва. Оценка целостности труб топливных каналов осуществляется с использованием четырех высокотемпературных динамических критериев разрушения: температурного, деформационного, силового и энергетического, полученных для двух диапазонов скорости нагрева трубы ТК u_T [2].

Температурный критерий разрушения представляет собой зависимость температуры разрыва трубы ТК T_w (°С) от внутреннего давления p (МПа):

$$\begin{aligned} &u_T \le 1 \text{ К/с:} \quad T_{wp}=796{,}4\cdot p^{-0{,}0988}; \\ &u_T > 1 \text{ К/с:} \quad T_{wp}=979{,}4\cdot p^{-0{,}1356}. \end{aligned} \tag{5}$$

Деформационный критерий разрушения представляет собой зависимость интенсивности разрывных деформаций ε_{ip} (относит. един.) от параметра K_{tm1} (Дж/кг):

$$\begin{aligned} &u_T \le 1 \text{ К/с:} \quad \varepsilon_{ip}=-6{,}0407 + 0{,}41194\cdot \ln K_{tm1}; \\ &u_T > 1 \text{ К/с:} \quad \varepsilon_{ip}=-0{,}4419 + 1{,}5164\cdot 10^{-7}\cdot K_{tm1} - 5{,}8036\cdot 10^{-15}\cdot K_{tm1}^{2}. \end{aligned} \tag{6}$$

Комплексный термомеханический параметр K_{tm1} связывает температуру трубы T_w, теплоемкость материала c_w, интенсивность напряжений σ_i и давление p:

$$K_{tm1} = \frac{c_w \cdot T_w \cdot \sigma_i}{p}.$$

Силовой критерий разрушения представляет собой зависимость интенсивности разрывных напряжений σ_{ip} (МПа) от параметра K_{tm2}:

$$\begin{aligned} &u_T \le 1 \text{ К/с:} \quad \sigma_{ip}=25105\cdot K_{tm2}^{-0{,}7985}; \\ &u_T > 1 \text{ К/с:} \quad \sigma_{ip}=23953\cdot K_{tm2}^{-0{,}7503}. \end{aligned} \tag{7}$$

Безразмерный комплексный термомеханический параметр K_{tm2} связывает температуру трубы T_w, теплоемкость c_w и плотность ρ_w материала, интенсивность деформаций ε_i и давление p:

$$K_{tm2} = \frac{c_w \cdot \rho_w \cdot T_w}{p \cdot \varepsilon_i}.$$

Энергетический критерий разрушения представляет собой зависимость удельной мощности разрывной деформации j_i (Вт/кг) от температуры трубы ТК T_w (°С) в двух температурных диапазонах:

$$
\begin{aligned}
&600\ ^{o}\mathrm{C} \le T_w \le 780\ ^{o}\mathrm{C}: \quad j_{ip} = -8{,}58388\cdot 10^{7} + 797061\cdot T_w - 3079{,}41\cdot T_w^{2} + 6{,}336043\cdot T_w^{3} - \\
&\qquad -7{,}322469\cdot 10^{-3}\cdot T_w^{4} + 4{,}506571\cdot 10^{-6}\cdot T_w^{5} - 1{,}15385\cdot 10^{-9}\cdot T_w^{6}; \\
&780\ ^{o}\mathrm{C} < T_w \le 1050\ ^{o}\mathrm{C}: \quad j_{ip} = 9{,}00264\cdot 10^{7} - 581258{,}59\cdot T_w + 1561{,}12\cdot T_w^{2} - 2{,}23237\cdot T_w^{3} + \\
&\qquad + 1{,}7925482\cdot 10^{-3}\cdot T_w^{4} - 7{,}6633326\cdot 10^{-7}\cdot T_w^{5} + 1{,}362675\cdot 10^{-10}\cdot T_w^{6}.
\end{aligned}
\tag{8}
$$

Зависимость $j_{ip}(T_w)$ малочувствительна к скорости нагрева, и значения j_{ip}, полученные для разных скоростей нагрева, описываются одной корреляцией. Критерий j_i определяется через интенсивность напряжений σ_i, интенсивность скоростей деформаций ξ_i и плотность ρ_w материала трубы и характеризует удельную работу деформации, совершаемую внутренним давлением в единицу времени:

$$j_i = \frac{\sigma_i \cdot \xi_i}{\rho_w}.$$

Одновременное использование в коде КАТРАН1 четырех критериев разрушения, основанных на различных физических параметрах температурного и напряженно-деформированного состояний канальной трубы, повышает достоверность расчетной оценки и точность определения параметров разрыва. В случае разрыва ТК определяются момент разрушения, температура и деформация трубы.

Область применения кода: по температуре – 300-1000 °С; по давлению – 0,5-8 МПа; по скорости нагрева – до 50 К/с.

В качестве исходных данных для расчета деформации и разрушения труб ТК при аварийном нагреве по коду КАТРАН1 используются данные по температуре канальных труб и давлению, полученные при расчете параметров контура циркуляции с помощью теплогидравлического кода RELAP5/mod3.2.

Постановка задачи

В результате разрыва РГК происходит истечение теплоносителя из контура циркуляции, что приводит к снижению и прекращению расхода в каналах аварийного коллектора и нагреву канальных труб выше температуры начала вязкопластического деформирования. Вместе с тем, при частичных разрывах РГК аварийный нагрев труб ТК на начальной стадии аварии происходит при сохранении достаточно высокого уровня давления в каналах. В этих условиях возможна значительная пластическая деформация канальных труб, что может привести к их разрушению в пределах РП.

Расчетным анализом теплогидравлических процессов при частичных разрывах РГК установлено, что наиболее опасным с точки зрения нагрева труб ТК является критический разрыв РГК с эквивалентной площадью проходного сечения 243 см^2. С помощью расчета параметров КМПЦ по коду RELAP5/mod3.2 определена динамика давления в каналах аварийного РГК и температура канальных труб.

На Рис. 1 показано изменение среднего по длине ТК давления в каналах аварийного РГК в процессе истечения теплоносителя из разрыва. Начальное давление ~7,5 МПа быстро спадает и примерно через 4 минуты стабилизируется на уровне ~3,7 МПа. Приблизительно через 7 минут после разрыва РГК темп падения давления снова возрастает, в результате чего происходит интенсивный заброс влаги в каналы и колебание температуры канальных труб около значения 400 °С.

Аварийный сценарий с частичным разрывом РГК предполагает, что нагрев канальных труб будет происходить при остаточном уровне энерговыделения в условиях низкого и нестабильного расхода. Динамика температуры труб будет определяться начальной мощностью и расходом в данной группе каналов. На Рис. 2 показано изменение максимальной по высоте температуры труб пяти групп каналов с наибольшей мощностью. Из графиков следует, что максимальная температура трубы 627 ^{o}C при среднем давлении 3,74 МПа достигается на 283-ей секунде в верхней части канала максимальной мощности. В дальнейшем в результате заброса влаги из нижней части каналов происходит достаточно резкое снижение температуры труб ТК.

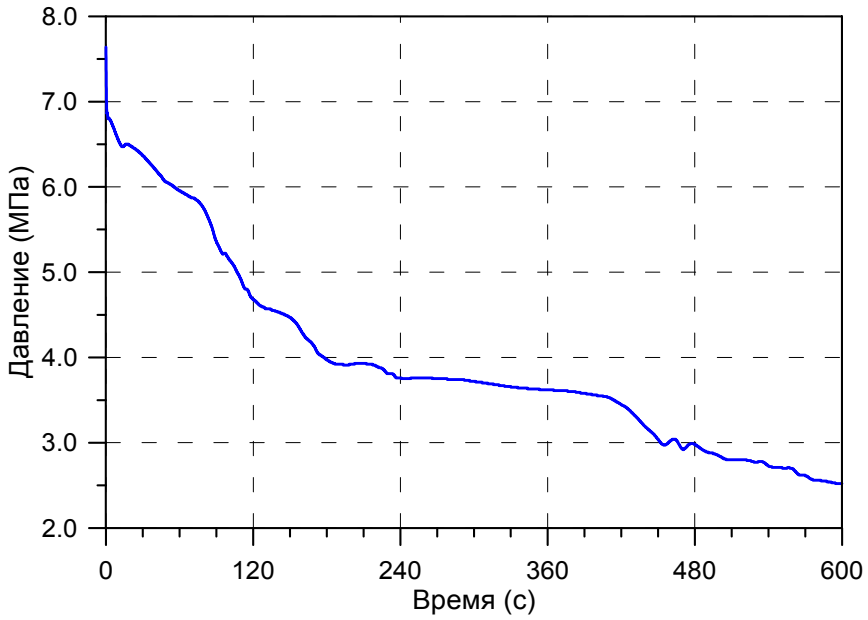


Рис. 1. Изменение среднего давления по высоте ТК при частичном разрыве РГК
Fig. 1. Change in time of average pressure in Fuel Channel at DGH partial break

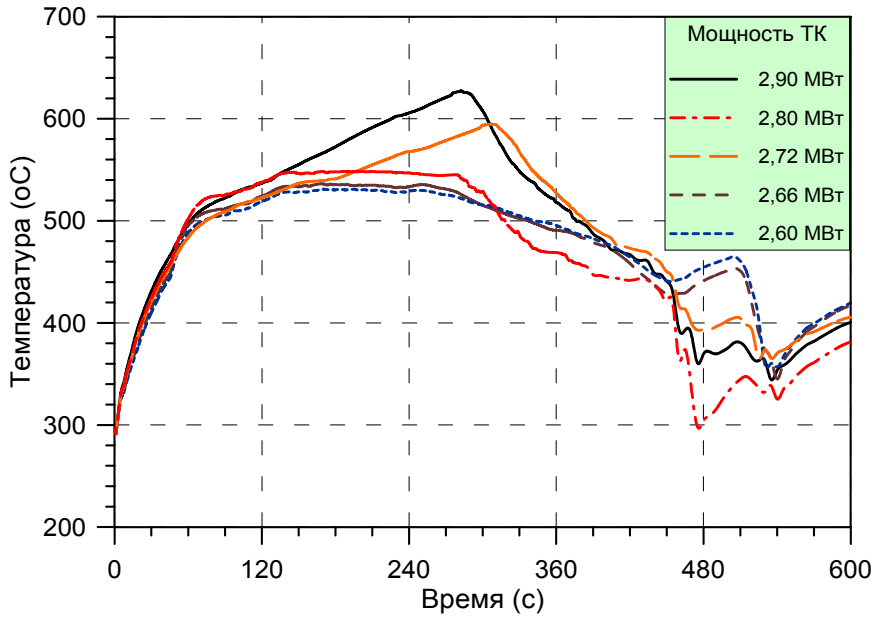


Рис. 2. Изменение температуры труб ТК разных групп мощности при частичном разрыве РГК
Fig. 2. Change in time of Pressure Tube (PT) temperature of different power groups at DGH partial break

Расчет деформации проводится для труб пяти групп каналов, максимальная температура труб которых при аварии превышает 500 °С (см. Рис. 2), что приводит к заметной вязкопластической деформации канальных труб. Скорость деформации труб очень чувствительна к изменению температуры, поскольку между этими параметрами существует экспоненциальная зависимость (см. уравнения (1) - (2)). На Рис. 3 показано изменение скорости относительной окружной деформации канальных труб в процессе аварийного нагрева, рассчитанное по коду КАТРАН1. В процессе нагрева скорость деформации увеличивается на несколько порядков. На графике отчетливо видно, что при изменении температуры труб от 500 до 600 °С скорость деформации увеличивается более чем в десять раз. Спад температуры после достижения максимума приводит к резкому снижению скорости деформации. Таким образом, большая чувствительность скорости деформации к изменению температуры ставит достаточно жесткие требования к погрешности расчета температуры труб ТК.

После расчета скорости деформации определяется деформация труб каналов разной мощности. На Рис. 4 показано увеличение относительной окружной деформации канальных труб в процессе аварийного нагрева, рассчитанное с помощью кода КАТРАН1. Максимальная окружная относительная деформация 3,2% получена для труб ТК наибольшей мощности 2,90 МВт (верхняя кривая на Рис. 4) примерно через минуту после достижения максимума температуры. В дальнейшем рост деформации прекращается из-за резкого снижения скорости деформации, вызванного падением температуры. Достигнутая при данных аварийных условиях максимальная деформация труб близка к проектной величине зазора ~3,5% в системе труба ТК – КТК – графитовые блоки. Таким образом, трубы каналов максимальной мощности претерпят достаточно большую пластическую деформацию, что потребует их замены, независимо от сохранения их целостности. Деформация труб каналов меньшей мощности (вплоть до значения 2,60 МВт) превысит 0,5%, что больше величины деформации, соответствующей условному пределу текучести материала труб ТК. Таким образом, можно утверждать, что вследствие аварийного перегрева трубы ТК мощностью от 2,60 до 2,90 МВт будут существенно деформированы в пластической области.

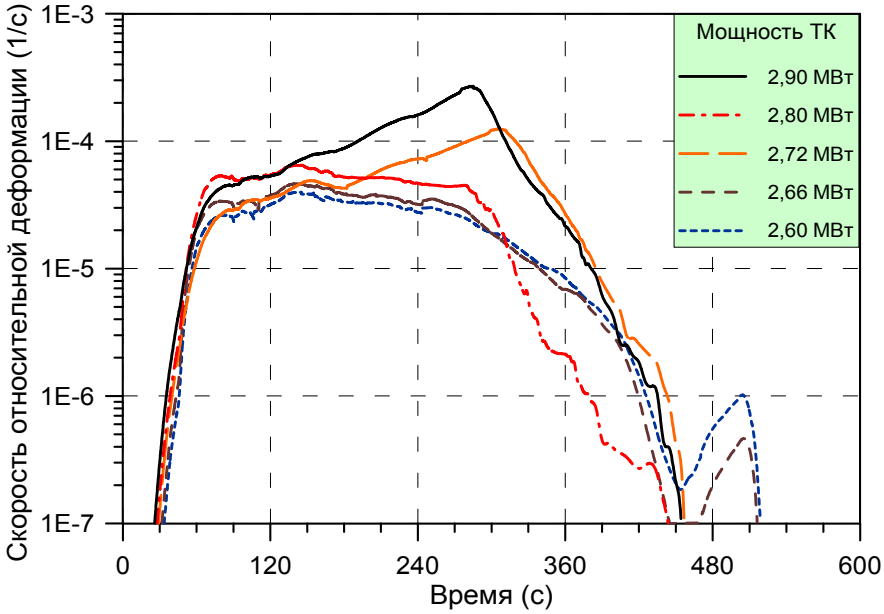


Рис. 3. Изменение скорости относительной деформации труб ТК разных групп мощности при частичном разрыве РГК

Fig. 3. Change in time of PT strain rate of different power groups at DGH partial break

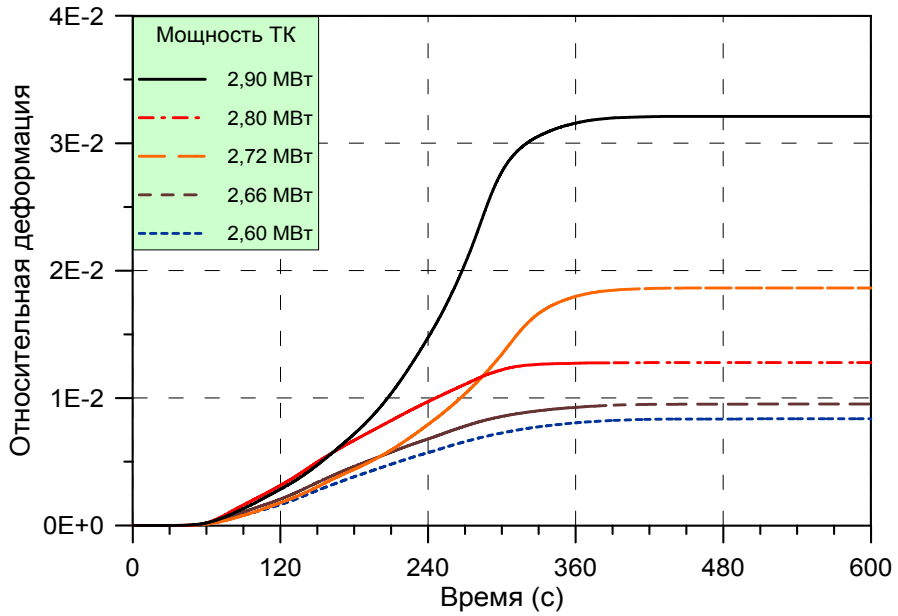


Рис. 4. Увеличение относительной деформации труб ТК разных групп мощности при частичном разрыве РГК

Fig. 4. Change in time of PT strain of different power groups at DGH partial break

Как следует из представленных результатов расчета, разрыва труб топливных каналов максимальной мощности при заданных аварийных условиях не произойдет. То же самое можно сказать и о каналах меньшей мощности.

Оценка критической температуры труб ТК

Наряду с проведенной оценкой целостности при заданных аварийных условиях код КАТРАН1 позволяет определить критическое значение температуры канальных труб, приводящее к их разрыву при заданном давлении. С целью определения такой критической температуры при частичном разрыве РГК проведен расчет деформации и разрушения трубы ТК при условии, что давление сохраняется на уровне, определенном графиком на Рис. 1, а температура трубы задается выше максимальной расчетной температуры (верхняя кривая на Рис. 2) на 50 ^{o}C.

Расчет проведен для условий свободного деформирования трубы ТК без взаимодействия с графитовой колонной. На Рис. 5 показано изменение относительной окружной деформации канальной трубы. Максимальная расчетная деформация в данных условиях превысит величину 13%. Проведенная оценка целостности трубы в данных условиях показывает, что ее разрыв произойдет на 362-ой секунде при температуре T_w=567 ^{o}C и давлении p=3,6 МПа. Величина окружной деформации при этом составит ε_θ=13%. При этом необходимо отметить, что разрыв трубы произойдет уже на стадии снижения ее температуры, когда интегральная деформация трубы превысит допустимые пределы.

Таким образом, можно сделать вывод, что повышение максимальной расчетной температуры трубы ТК на 50 ^{o}C может вызвать ее разрушение. Вместе с тем, прочность графитовых блоков в данных условиях может оказаться достаточной, чтобы гарантировать сохранение целостности канальной трубы после ее посадки на графит.

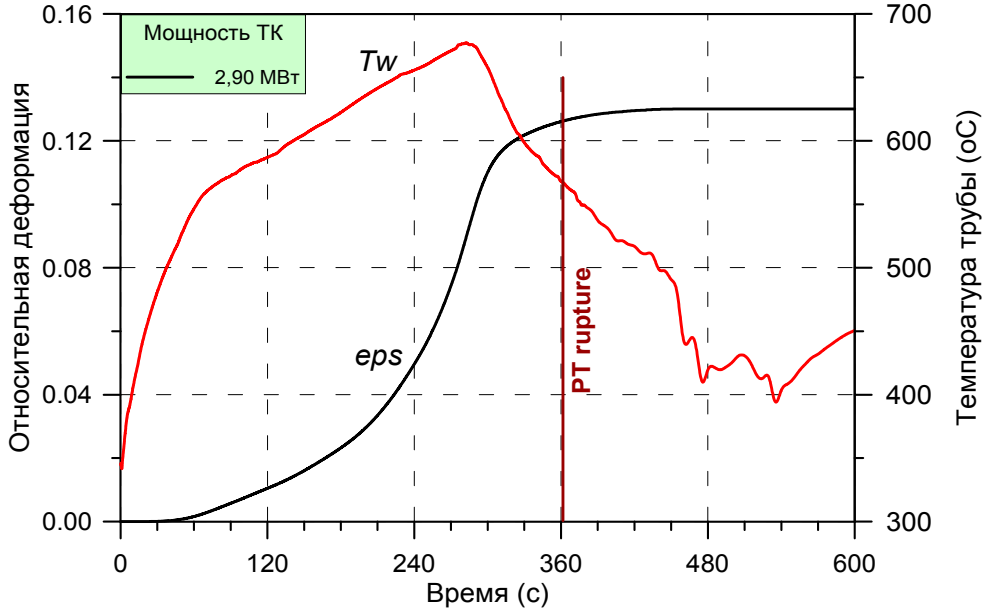


Рис. 5. Увеличение относительной деформации трубы ТК максимальной температуры
Fig. 5. Increase of PT strain at maximum temperature

Выводы

С использованием кода КАТРАН1 проанализировано деформационное поведение труб ТК разной мощности при аварийном нагреве. В качестве граничных условий использованы результаты расчета теплогидравлических процессов в контуре циркуляции при частичных разрывах РГК, выполненные по коду RELAP5/mod3.2.

Максимальная окружная относительная деформация 3,2% получена для труб ТК наибольшей мощности 2,90 МВт примерно через минуту после достижения максимума температуры. В дальнейшем рост деформации прекращается из-за резкого снижения температуры труб. Деформация труб каналов меньшей мощности (до 2,60 МВт) также превышает условный предел текучести материала труб ТК.

Проведенная оценка целостности канальных труб показывает, что разрыва труб ТК максимальной мощности при заданных аварийных условиях не происходит. При условии повышения температуры труб на 50 ^{o}C от достигнутого максимума возможно их разрушение без учета сопротивления графитовых блоков. Вместе с тем, прочность графитовых блоков в данных условиях оказывается достаточной, чтобы гарантировать сохранение целостности канальной трубы после ее посадки на графит.

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что частичный разрыв РГК, обеспечивающий достижение максимальных температур оболочек твэлов и канальных труб на начальном этапе аварии, не приводит к разрушению труб ТК данного РГК под действием внутреннего давления при повышенных температурах.

---

1 Novoselsky O.Yu., Filinov V.N.. Computational Assessment of RBMK Pressure Tube Rupture at Accident Heating// Transac. of the International Information Exchange Forum on Analytical Methods and Computational Tools for NPP Safety Assessment, Obninsk (Russia), 8-12 September, 1997.- Washington (USA), 1997.- V.II.- P.562-576.

2 Новосельский О.Ю., Филинов В.Н. Критерии разрушения труб топливных каналов РБМК при аварийном нагреве//Атомная энергия.- 1997.- Т.82, вып.4.- С.277-282

Расчет деформации и целостности топливных каналов РБМК при частичных разрывах РГК с использованием кода КАТРАН1

Calculation of Deformation and Integrity of RBMK Pressure Tubes at DGH Partial Break Using KATRAN1 Code

О.Ю.Новосельский, В.Н.Филинов

O.Yu.Novoselsky & V.N.Filinov

NIKIET-ENTEK

03.11.00

Аварии, связанные со снижением расхода или всплеском мощности:

- Нагрев труб ТК выше температуры начала вязкопластического деформирования
- Наличие существенного перепада давления на трубах каналов

Проблема: Динамический расчет высоко-температурной деформации и разрушения труб ТК в пределах активной зоны

КАТРАН1 - код для расчета деформации и разрушения труб ТК при аварийном нагреве

- Решается осесимметричная задача вязкопластического деформирования трубы под давлением в условиях однородного поля температур
- Учитывается совместная деформация канальной трубы с графитовой колонной
- Область применения кода: 300-1000 ^{o}C; 0,5-8 МПа; до 50 К/с

Методика расчета по коду КАТРАН1

- Исходная информация - динамика температуры трубы и давления в ТК
- Расчет скорости деформации по уравнениям высокотемпературной ползучести для сплава Zr+2,5%Nb
- Расчет НДС трубы, оценка её целостности
- Расчет разрушения графитовых блоков

Расчет скорости деформации канальных труб РБМК при аварийном нагреве

450-850 °С:

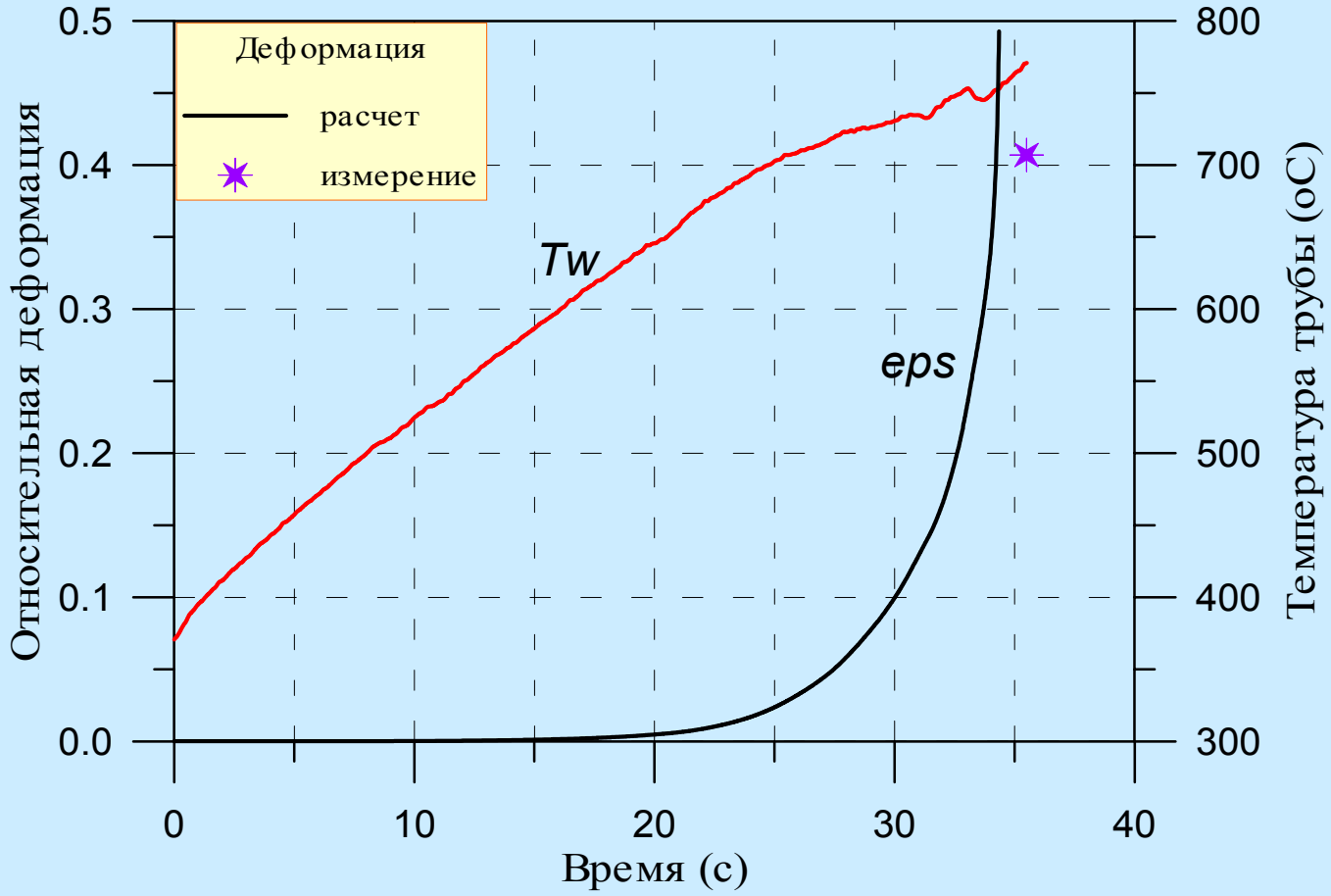
$$\xi_\theta = 1{,}3\cdot 10^{-5}\sigma_\theta^{9}\exp\left(-\frac{Q_1/R}{T_w}\right)+\frac{5{,}7\cdot 10^{7}\sigma_\theta^{1{,}8}\exp\left[-\left(Q_2/R\right)/T_w\right]}{\left[1+2\cdot 10^{10}\int_{\tau_1}^{\tau}\exp\left[-\left(Q_3/R\right)/T_w\right]d\tau\right]^{0{,}42}}$$

850-1200 °С:

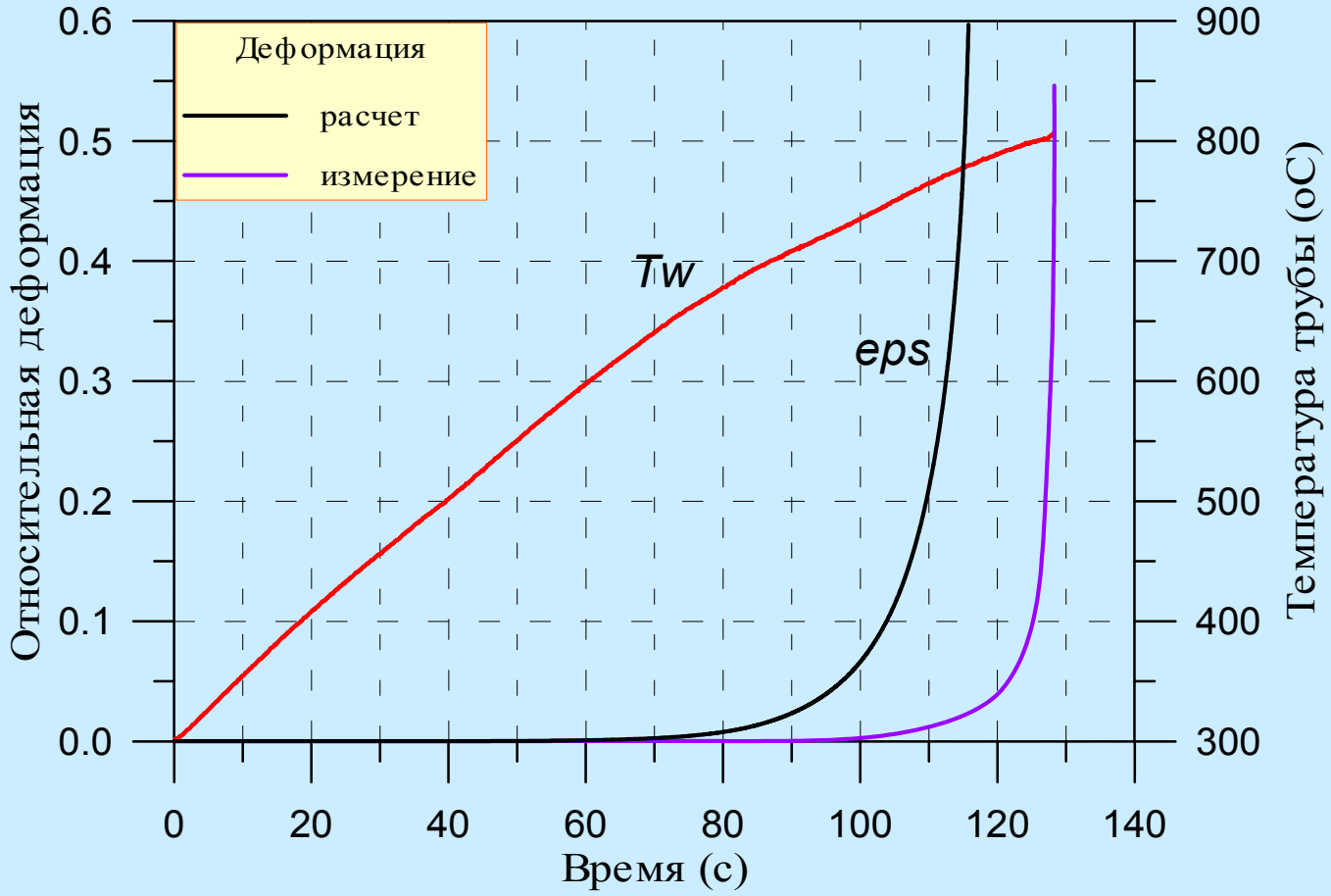
$$\xi_\theta = 10{,}4\sigma_\theta^{3{,}3}\exp\left(-\frac{Q_4/R}{T_w}\right)+\frac{3{,}5\cdot 10^{4}\sigma_\theta^{1{,}4}\exp\left[-\left(Q_5/R\right)/T_w\right]}{1+274\int_{\tau_2}^{\tau}\exp\left[-\left(Q_6/R\right)/T_w\right]\left(T_w-1105\right)^{3{,}72}d\tau}$$

σ_θ - текущее значение окружного напряжения (МПа);
T_w - текущее значение температуры трубы ТК (К);
Q_i/R - приведенные значения энергии активации ползучести (К);
τ_1 - время при T_w=700 °С, τ_2 - при T_w=850 °С, τ - время процесса

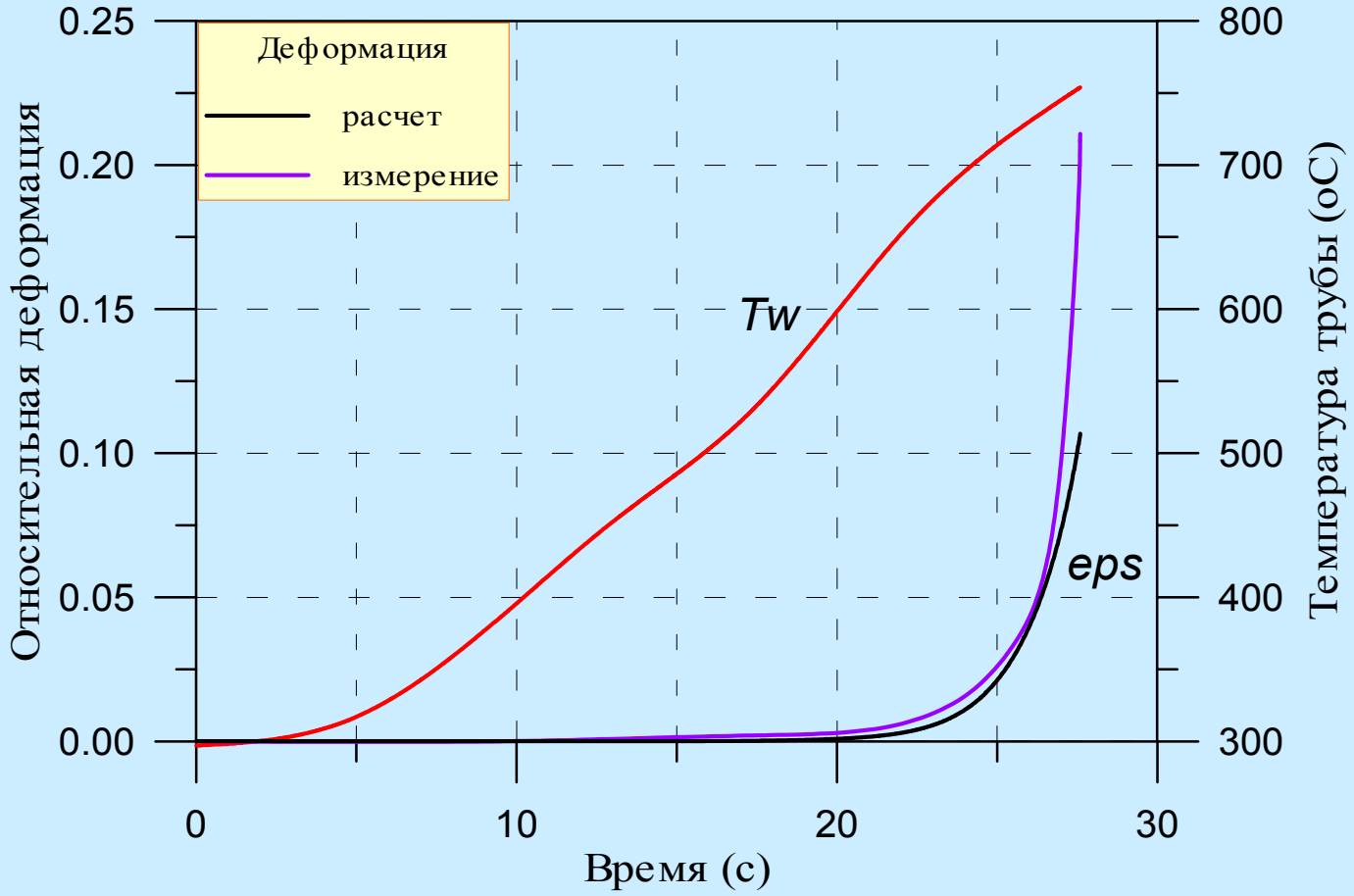
Расчет высокотемпературной ползучести (натурная труба ТК; p=6,5 МПа; T_{wp}=771 °С; $\varepsilon_{\theta p}$=0,41)



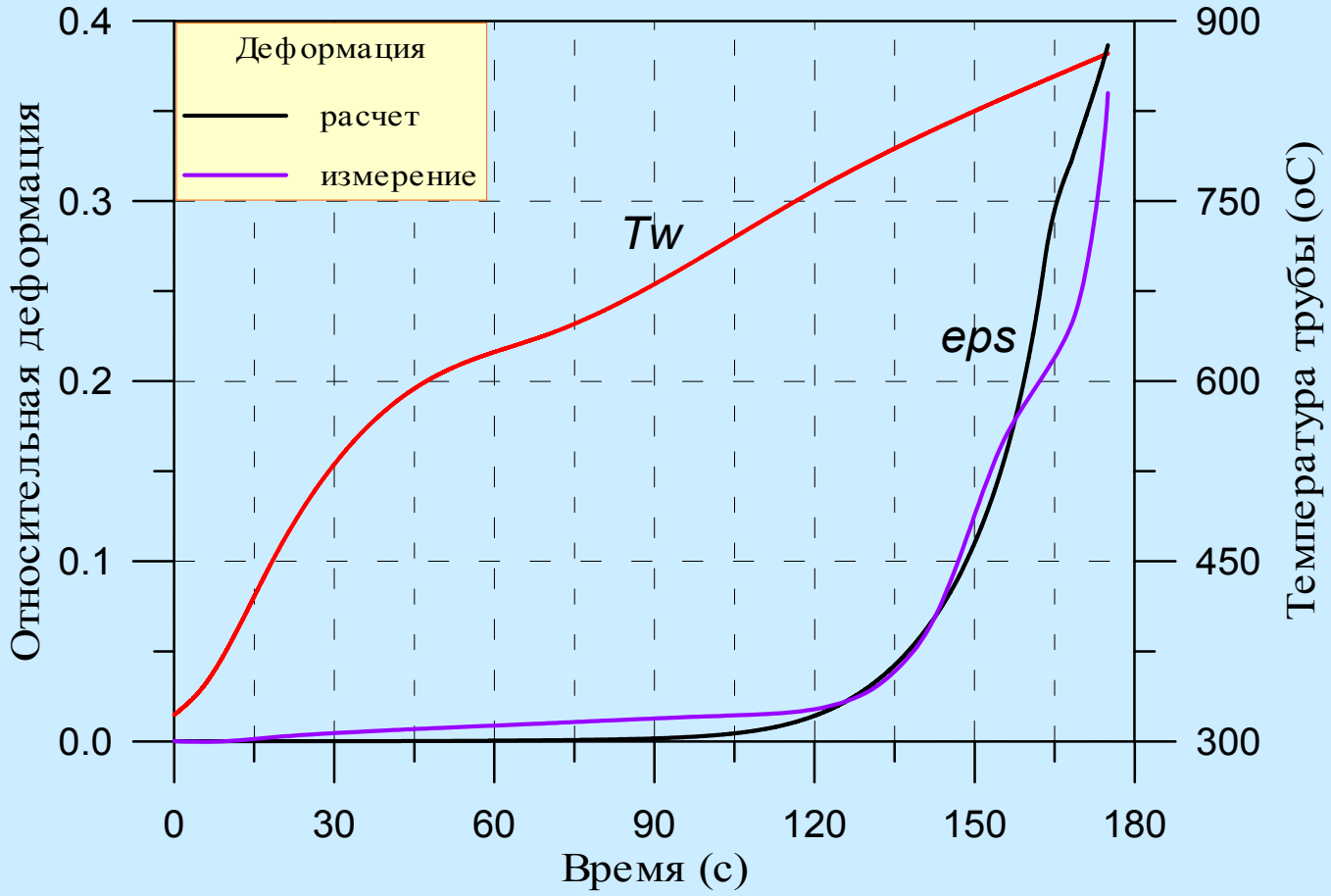
Расчет высокотемпературной ползучести (натурная труба ТК; p=3,3 МПа; T_{wp}=808 °С; $\varepsilon_{\theta p}$=0,55)



Расчет высокотемпературной ползучести (модель трубы ТК; p=7,9 МПа; T_{wp}=754 °С; $\varepsilon_{\theta p}$=0,21)



Расчет высокотемпературной ползучести (модель трубы ТК; p=1,0 МПа; T_{wp}=873 °С; $\varepsilon_{\theta p}$=0,40)



Оценка целостности труб ТК

- Температурный критерий - зависимость температуры разрыва от давления
- Деформационный критерий - зависимость деформации разрыва от K_{tm1}
- Силовой критерий - зависимость напряжений разрыва от K_{tm2}
- Энергетический критерий - зависимость мощности разрывной деформации от температуры

Оценка целостности труб ТК

Температурный критерий разрушения:

$u_T \le 1$ К/с: $T_{wp}=796{,}4\cdot p^{-0{,}0988}$

$u_T > 1$ К/с: $T_{wp}=979{,}4\cdot p^{-0{,}1356}$

Деформационный критерий разрушения:

$u_T \le 1$ К/с: $\varepsilon_{ip}=-6{,}0407 + 0{,}41194\cdot \ln K_{tm1}$

$u_T > 1$ К/с: $\varepsilon_{ip}=-0{,}4419 + 1{,}5164\cdot 10^{-7}\cdot K_{tm1} - 5{,}8036\cdot 10^{-15}\cdot K_{tm1}$

$$K_{tm1} = \frac{c_w \cdot T_w \cdot \sigma_i}{p}$$

Силовой критерий разрушения:

$u_T \le 1$ К/с: $\sigma_{ip}=25105\cdot K_{tm2}^{-0{,}7985}$

$u_T > 1$ К/с: $\sigma_{ip}=23953\cdot K_{tm2}^{-0{,}7503}$

$$K_{tm2} = \frac{c_w \cdot \rho_w \cdot T_w}{p \cdot \varepsilon_i}$$

Энергетический критерий разрушения:

600 °C$\le T_w \le$780 °C: $j_{ip}= -8{,}58388\cdot 10^7 + 797061\cdot T_w - 3079{,}41\cdot T_w^2 + 6{,}336043\cdot T_w^3 - 7{,}322469\cdot 10^{-3}\cdot T_w^4 + 4{,}506571\cdot 10^{-6}\cdot T_w^5 - 1{,}15385\cdot 10^{-9}\cdot T_w^6$

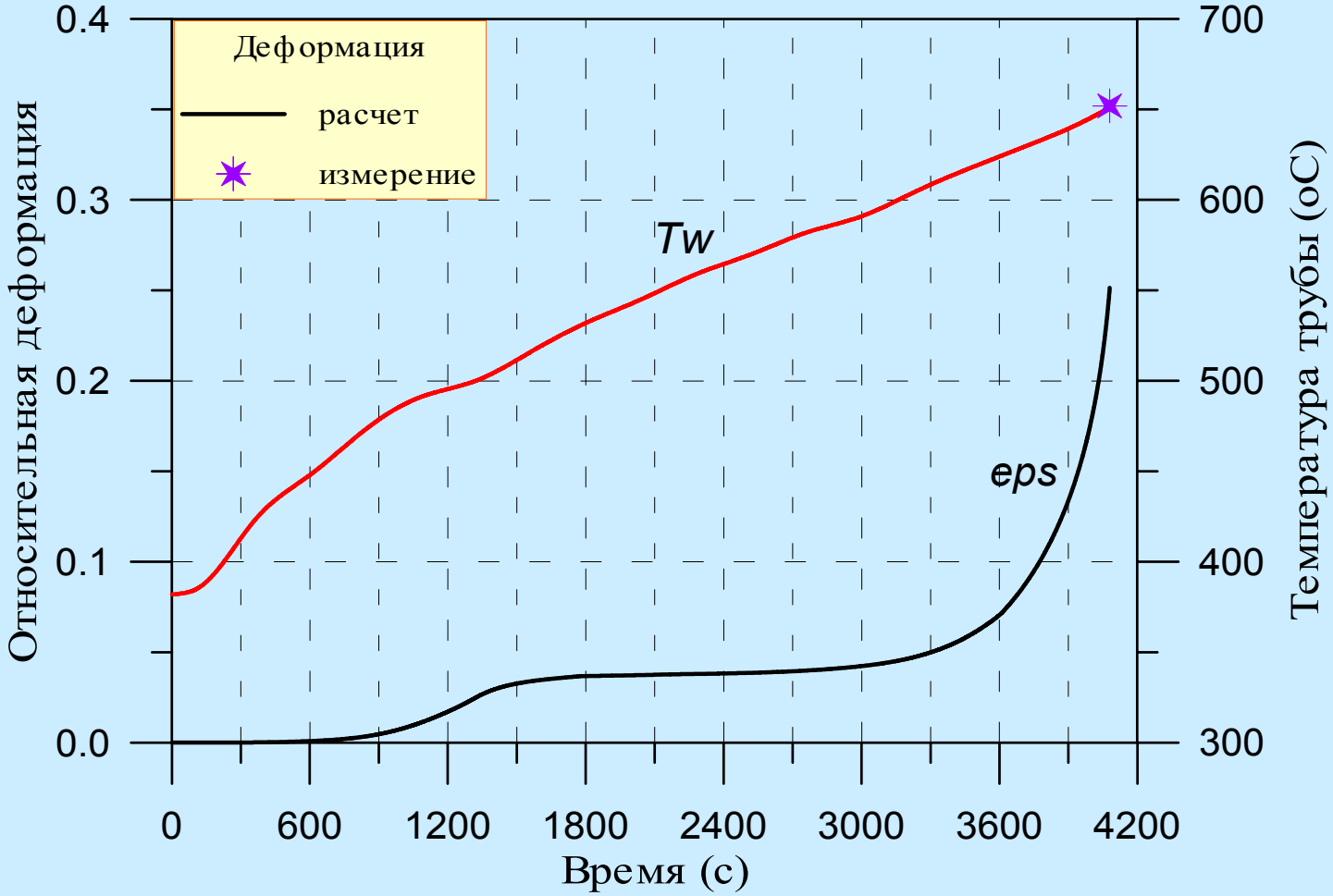
780 °C$< T_w \le$1050 °C: $j_{ip}= 9{,}00264\cdot 10^7 - 581258{,}59\cdot T_w + 1561{,}12\cdot T_w^2 - 2{,}23237\cdot T_w^3 + 1{,}7925482\cdot 10^{-3}\cdot T_w^4 - 7{,}6633326\cdot 10^{-7}\cdot T_w^5 + 1{,}362675\cdot 10^{-10}\cdot T_w^6$

$$j_i = \frac{\sigma_i \cdot \xi_i}{\rho_w}$$

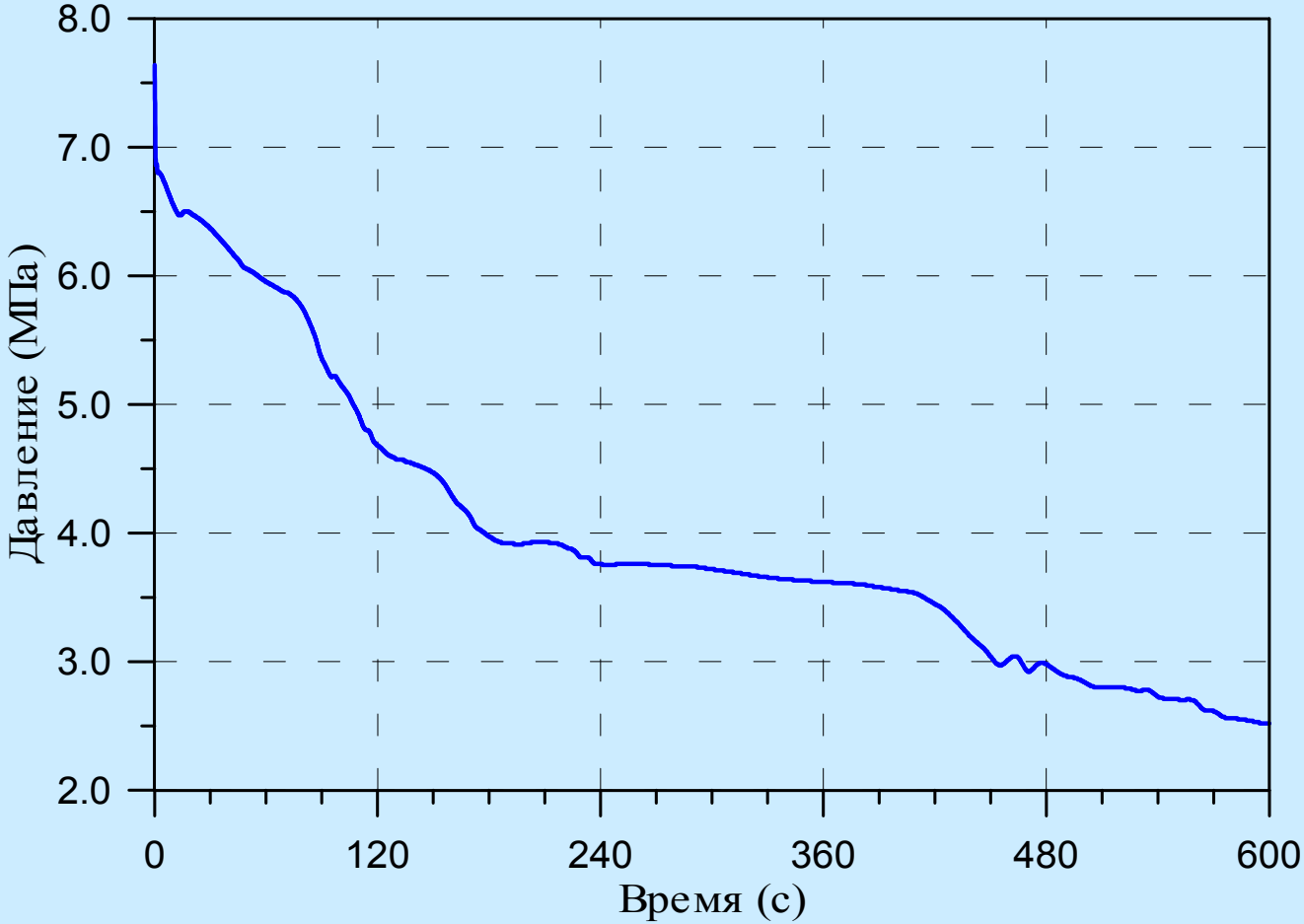
Методика расчета хрупкого разрушения графитовых блоков

- Оценка возникновения трещины на внутренней поверхности блоков по предельному давлению
- Расчет эволюции несквозной поверхностной трещины в графитовом блоке
- Разрушение блоков при проникновении двух диаметрально противоположных трещин на заданную глубину

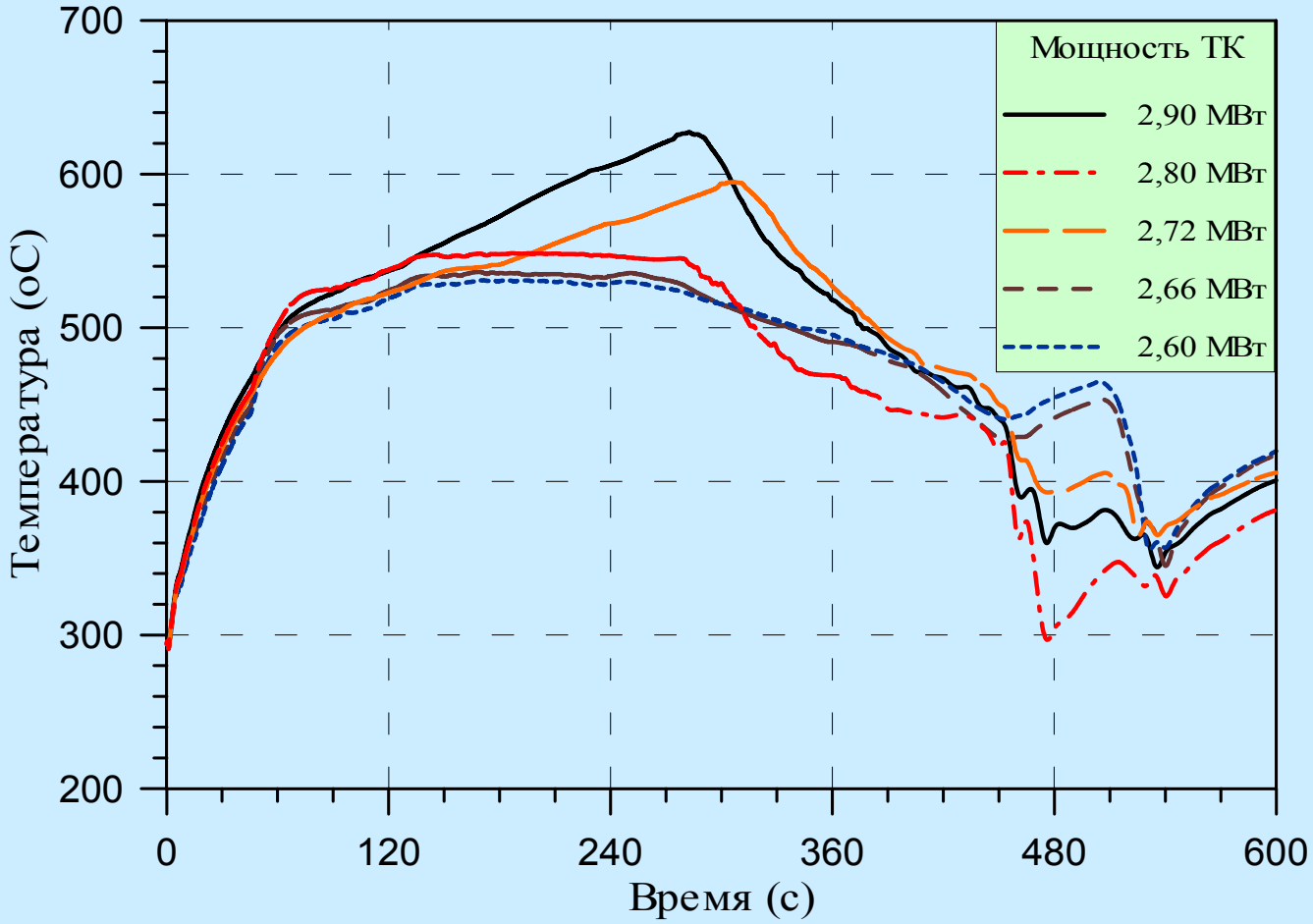
Расчет деформации и разрушения натурной трубы ТК с графитовой колонной (сравнение с экспериментом)



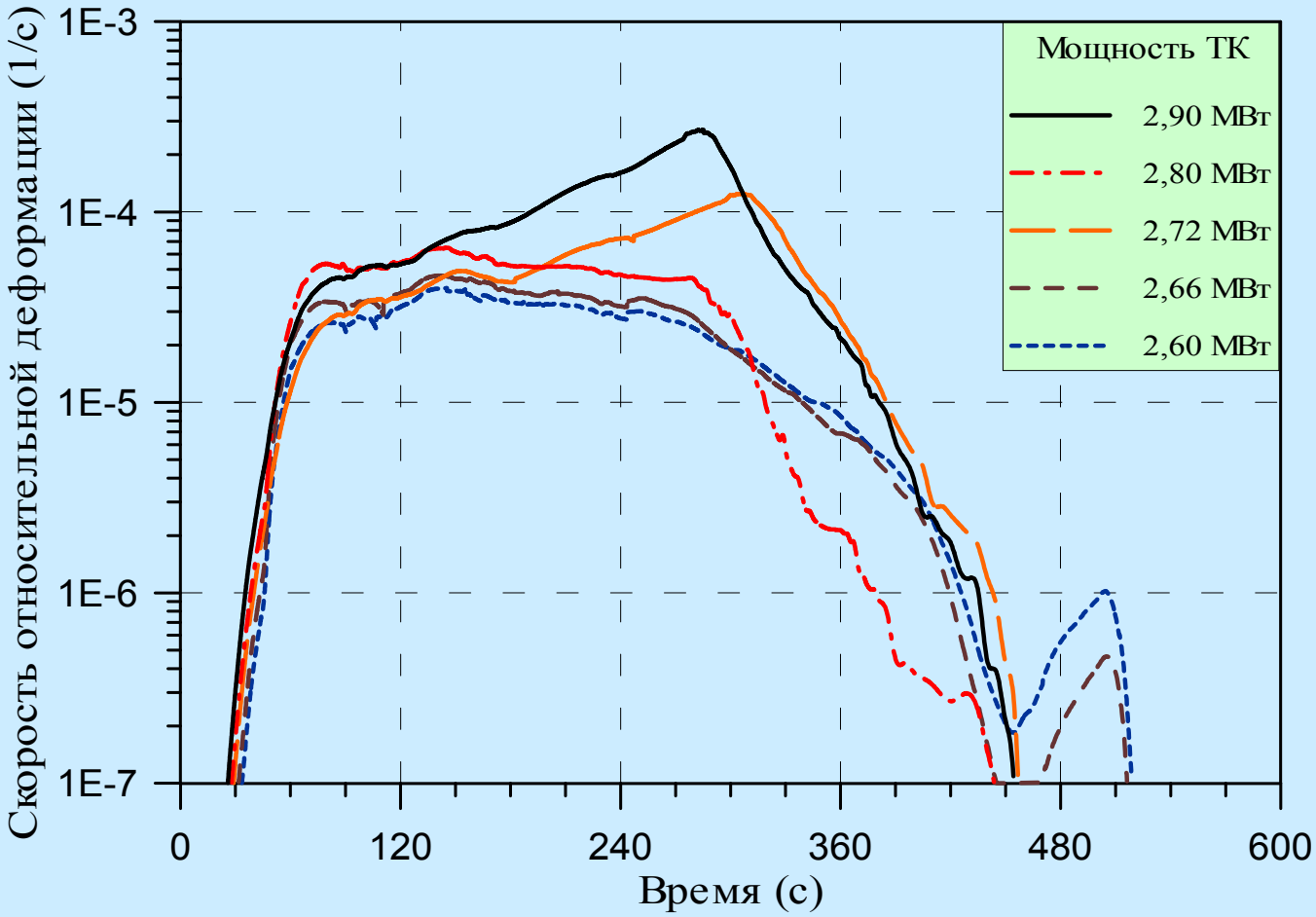
Пример расчета по коду КАТРАН1. Частичный разрыв РГК. Среднее давление по высоте ТК (расчет по RELAP5/mod3.2)



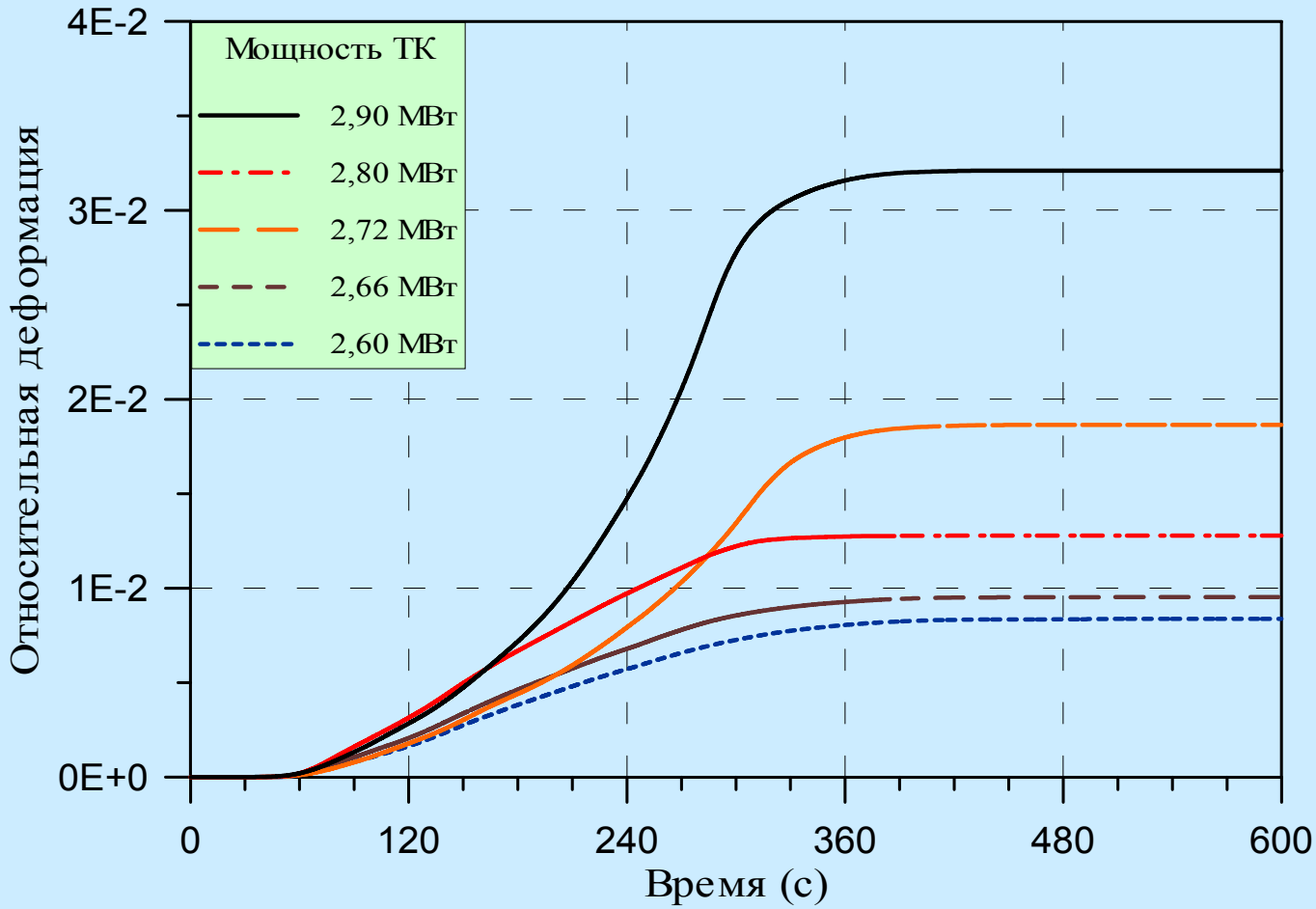
Пример расчета по коду КАТРАН1. Частичный разрыв РГК. Температура труб ТК разной мощности (расчет по RELAP5/mod3.2)



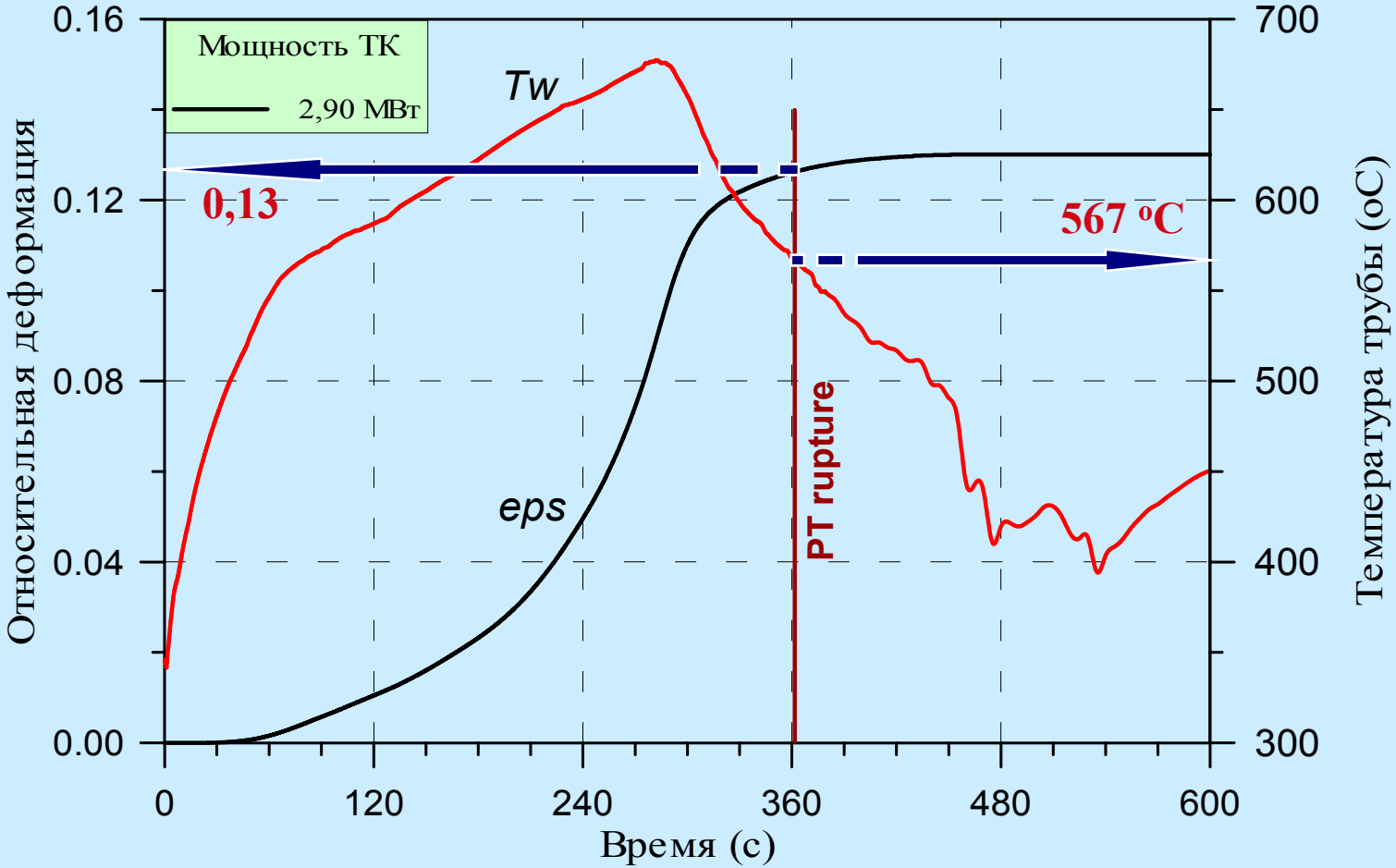
Пример расчета по коду КАТРАН1. Частичный разрыв РГК. Скорость деформации труб ТК разной мощности



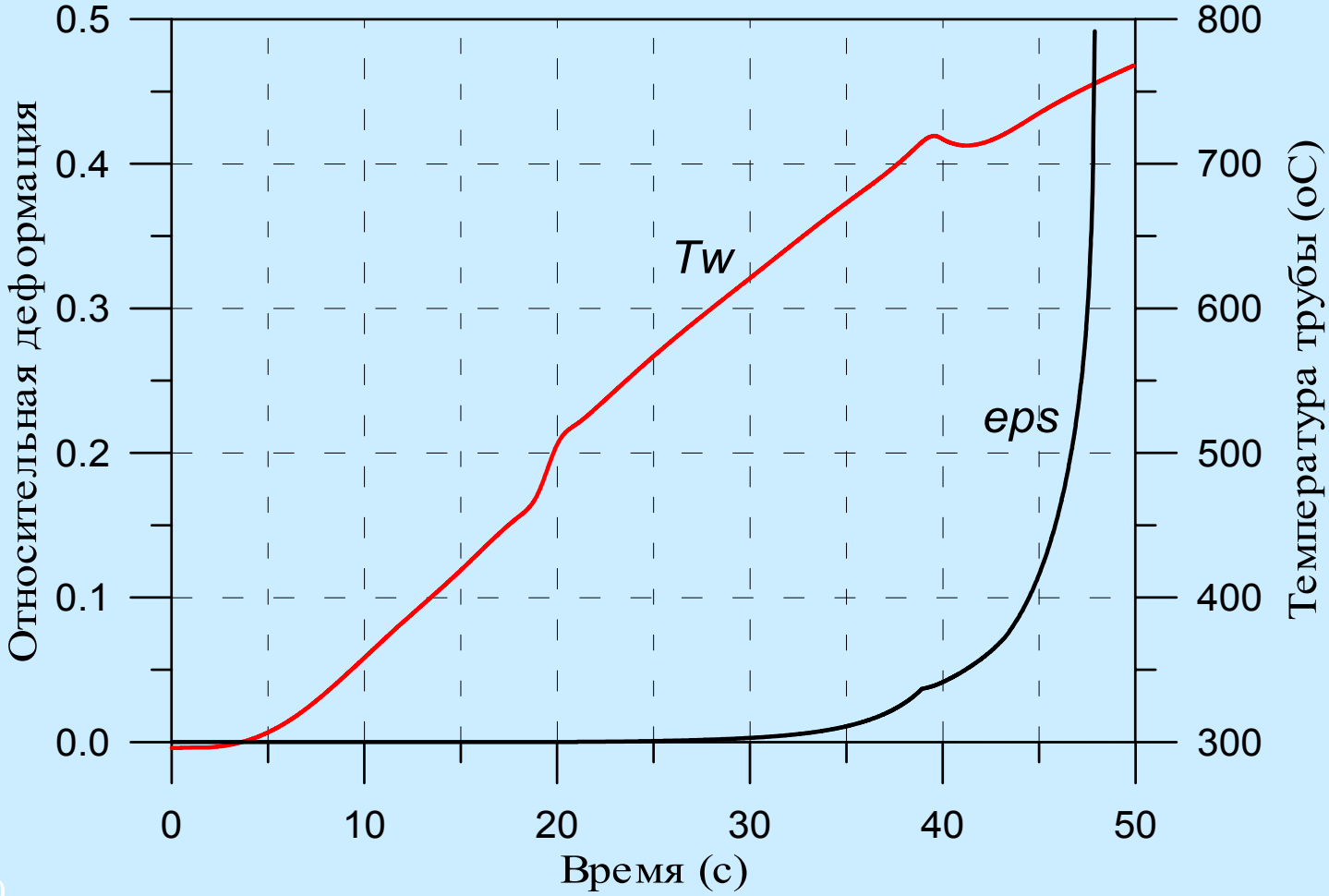
Пример расчета по коду КАТРАН1. Частичный разрыв РГК. Деформация труб ТК разной мощности (ε_θ^{max}=3,2%)



Частичный разрыв РГК. Деформация трубы с максимальной температурой (p_p=3,6 МПа; T_{wp}=567 °С; $\varepsilon_{\theta p}$=13%)



Расчет деформации и разрыва ТК 52-16 на ЛАЭС-3 в 1992 г. (p_p=7,4 МПа; T_{wp}=742 °С; $\varepsilon_{\theta p}$=18%)



Направления развития кода КАТРАН1

- Совершенствование расчетных моделей деформации и разрушения труб ТК и графитовых блоков
- Переход к многомерной модели деформации канальной трубы
- Верификация кода на результатах экспериментов с штатными трубами ТК
- Интеграция кода в комплексный код для расчета тяжелых аварий на РБМК