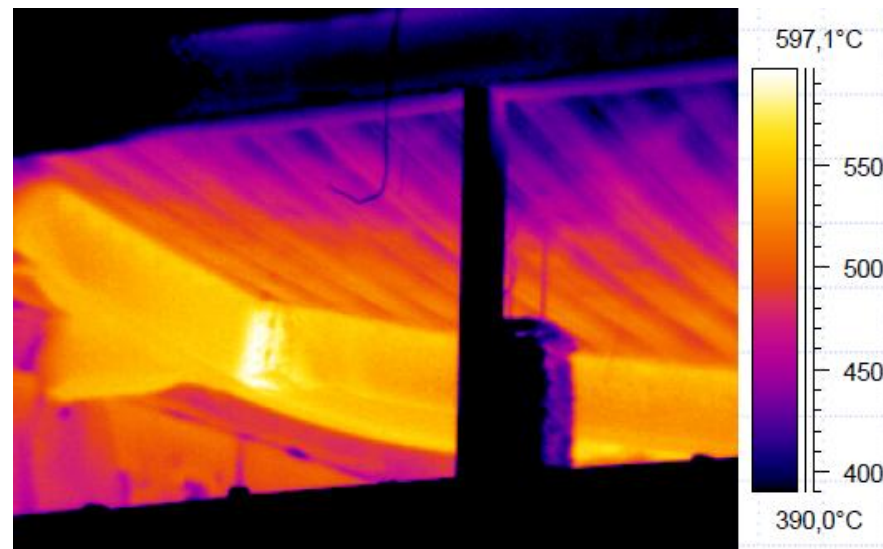
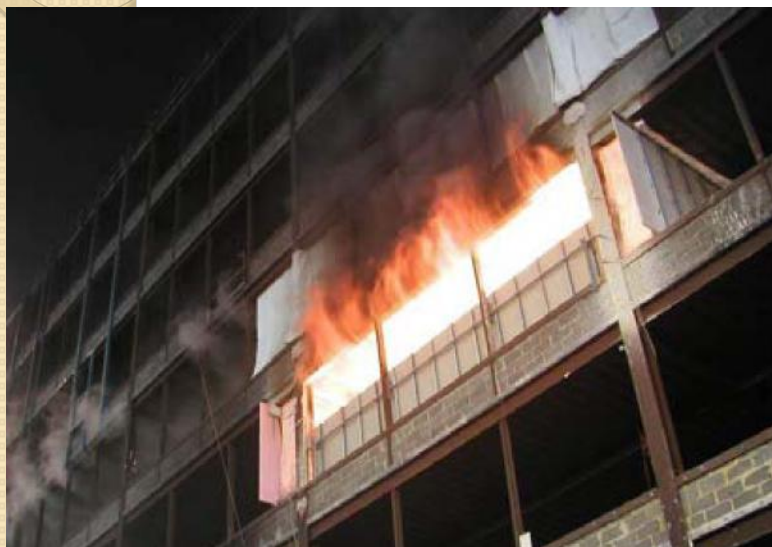


# Prenos toplote v konstrukciji med požarom



Tomaž Hozjan

e-mail: [tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si](mailto:tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si)

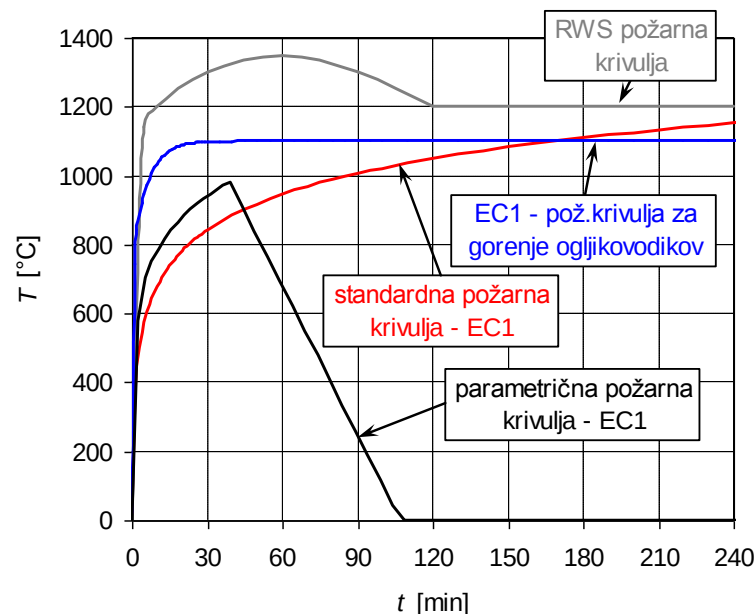
soba: 503

# Postopek projektiranja konstrukcij v požarnem projektnem stanju

Pri projektni analizi konstrukcije za primer požara je treba kot relevantne upoštevati naslednje korake:

- izbira za projektiranje merodajnih požarnih scenarijev;  
požarna obtežba, razvoj požara (HRR) (*poznamo*),
- določitev ustreznih projektnih požarov (*poznamo*).

**Rezultat:**



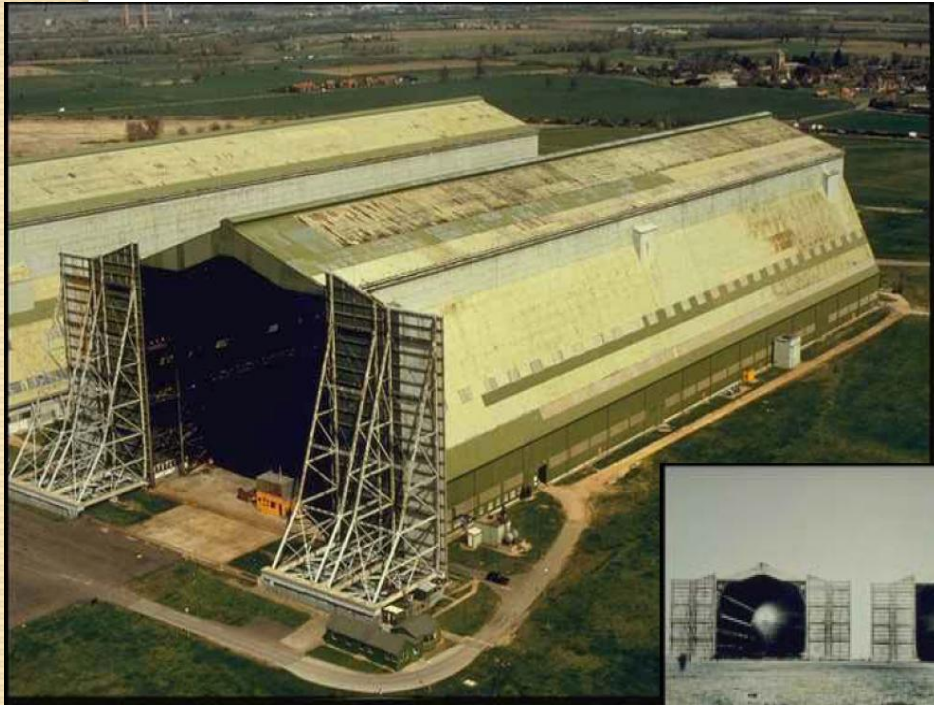
**\*požarne krivulje (krivulje temperatura-čas):** podajajo temperaturo plinov v okolici površine elementa kot funkcijo časa

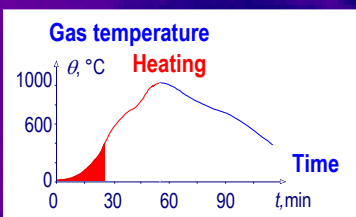
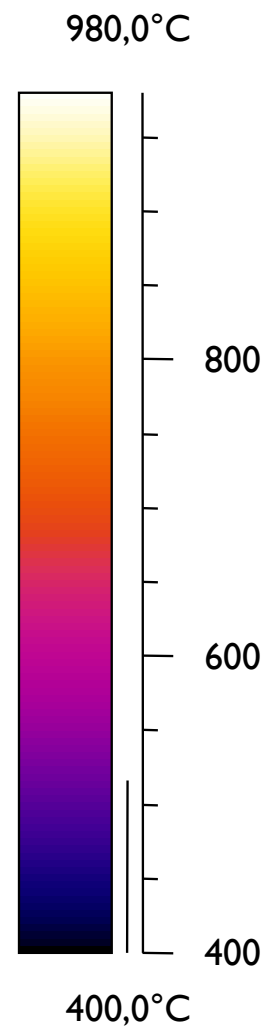
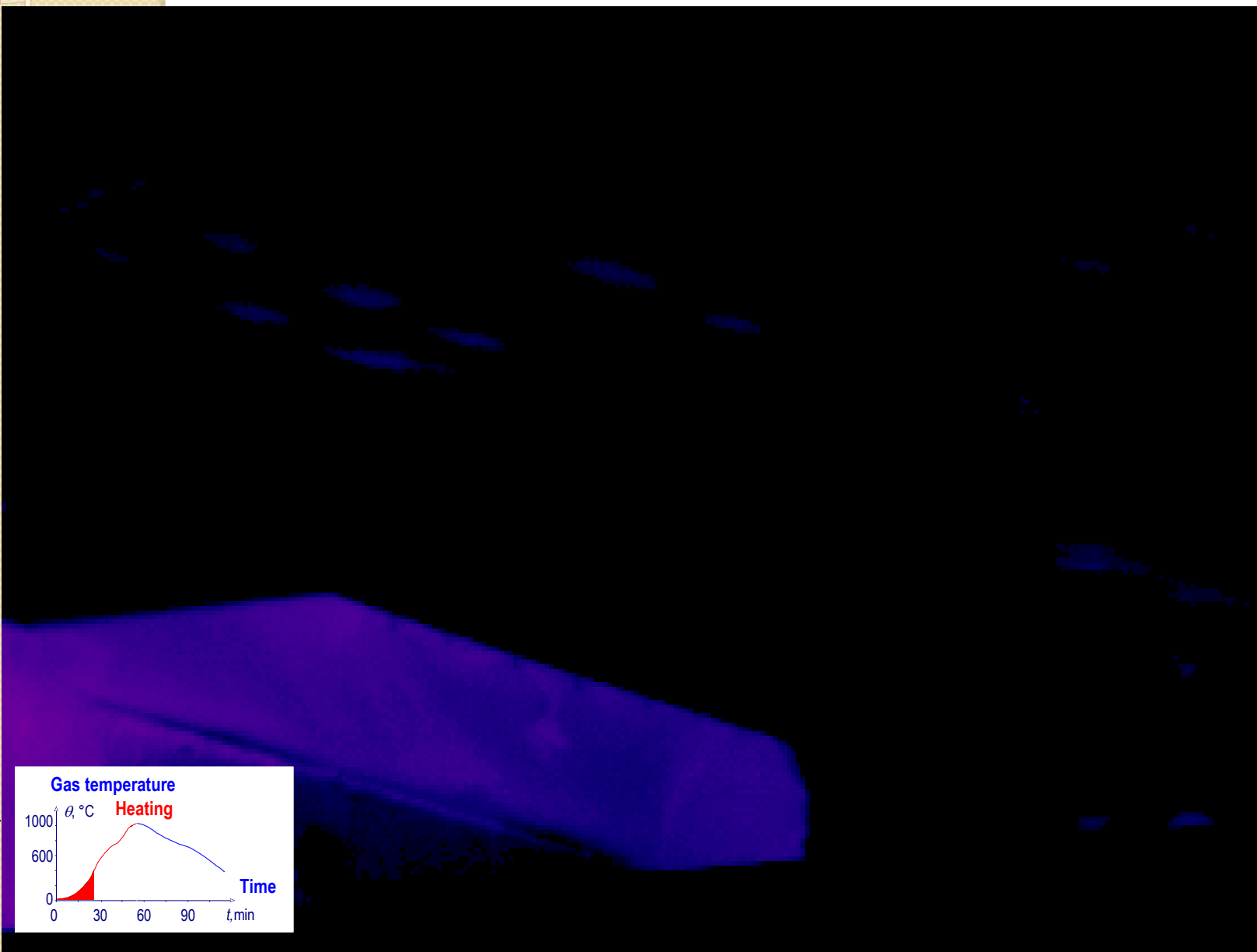
# Postopek projektiranja konstrukcij v požarnem projektne stanju

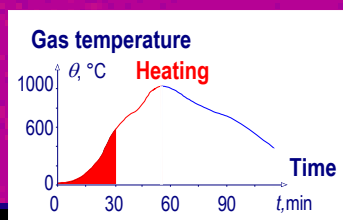
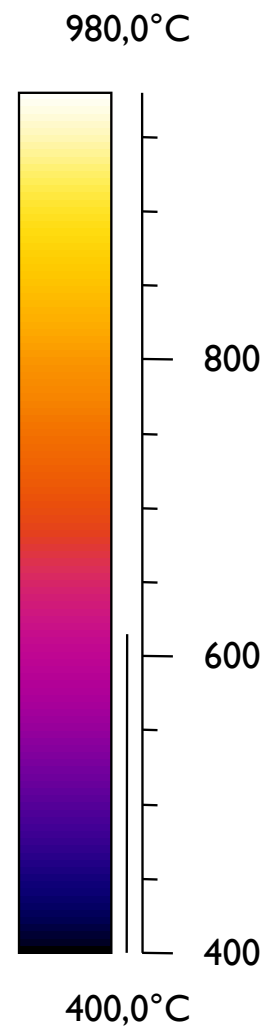
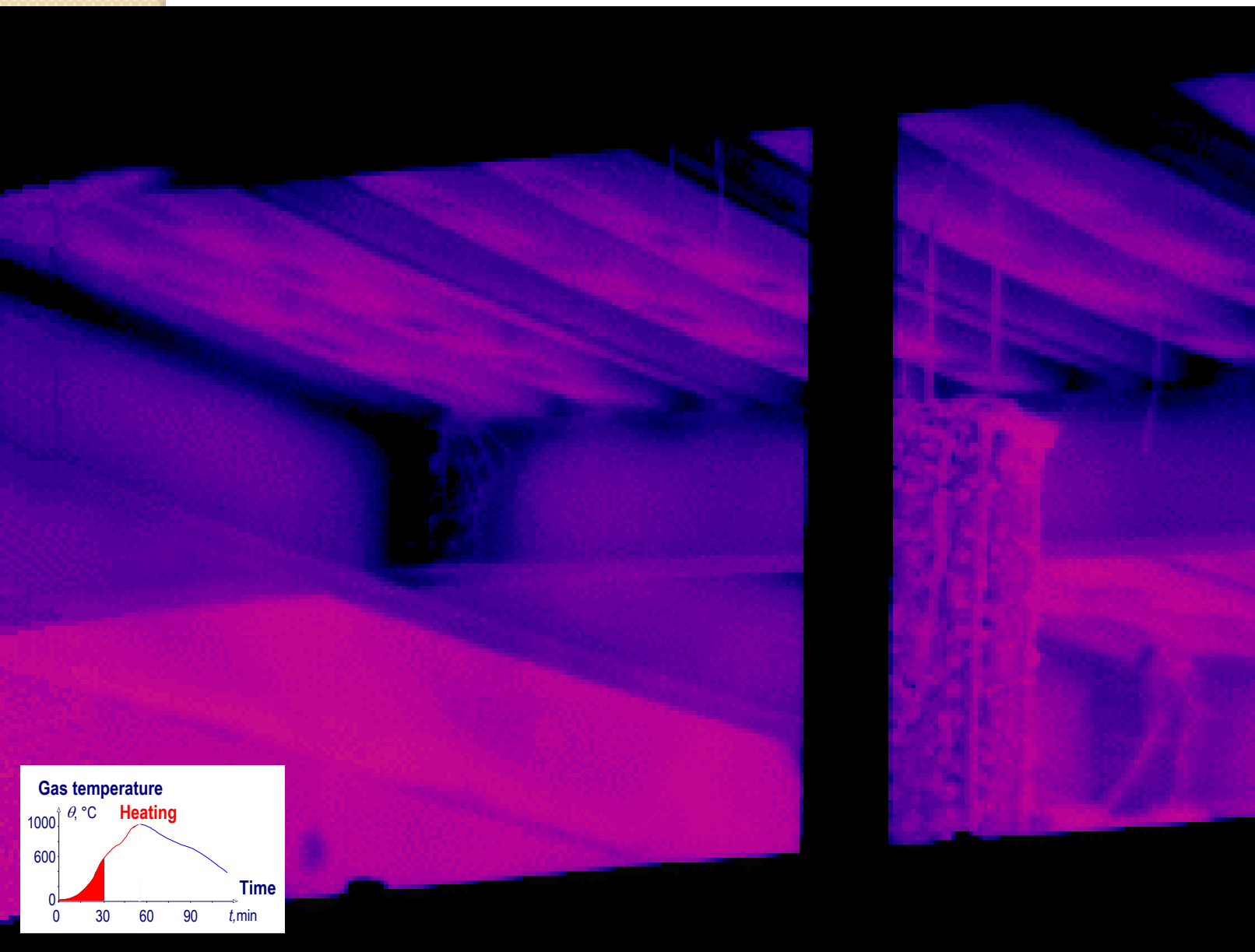
Pri projektni analizi konstrukcije za primer požara je treba kot relevantne upoštevati naslednje korake:

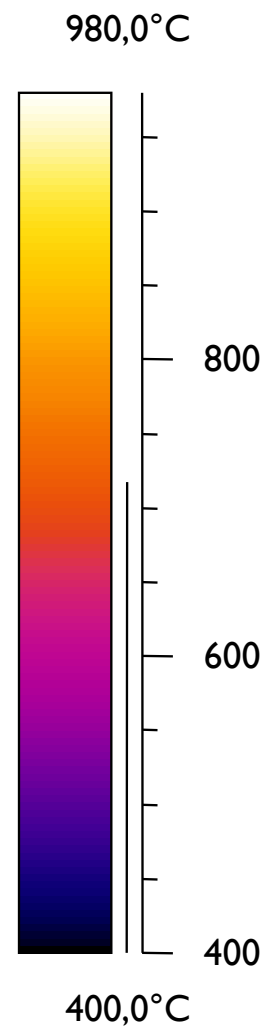
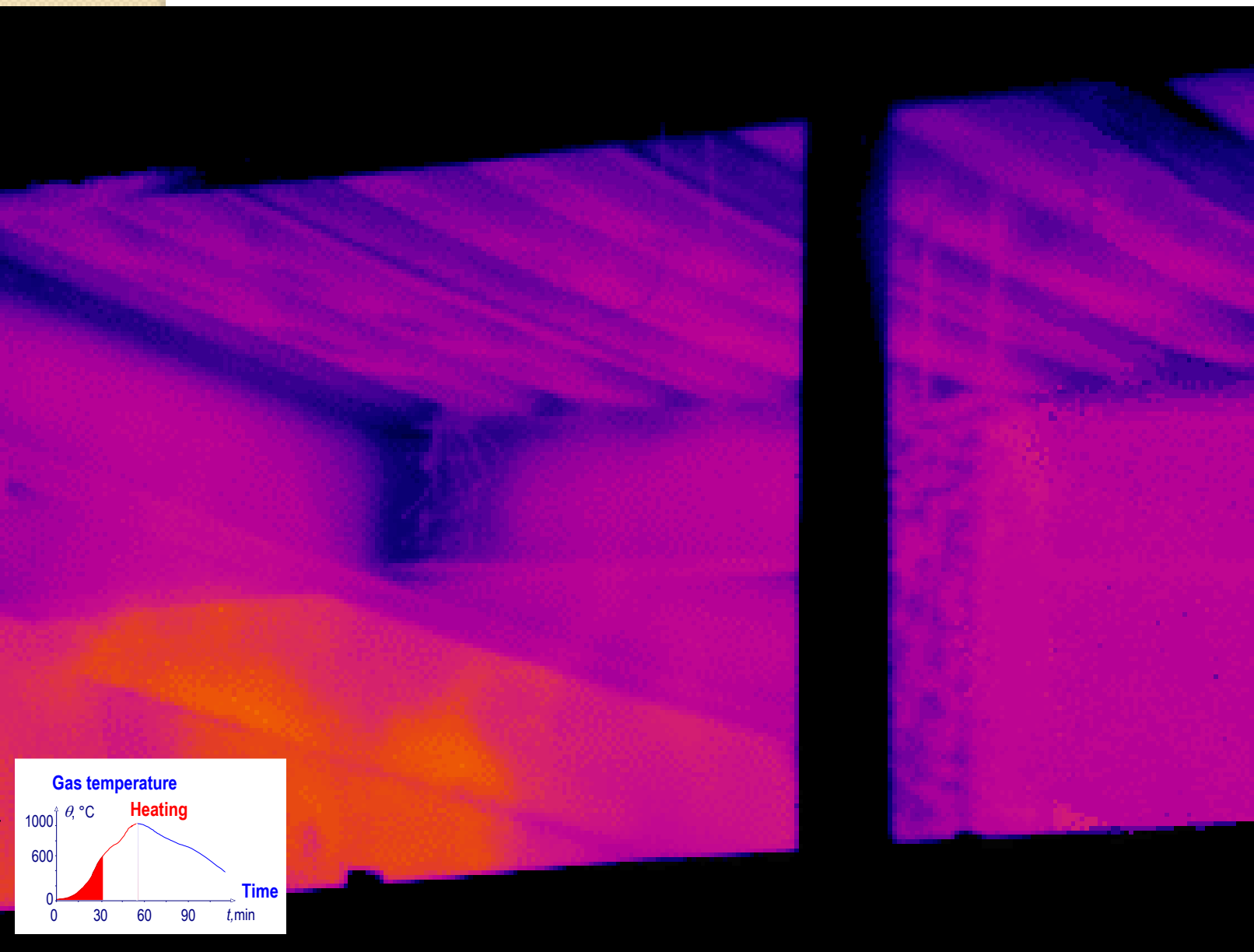
- izbira za projektiranje merodajnih požarnih scenarijev (*poznamo*)
- določitev ustreznih projektnih požarov (*poznamo*)
- **izračun razvoja temperaturnega polja konstrukcijskih elementov**  
(*trenutno obravnavamo*)
- **CILJ:** izračun mehanskega odziva obravnavane konstrukcije v požaru (požarna odpornost)

# Eksperiment CARDINGTON (1993, 2003)





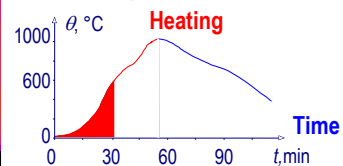




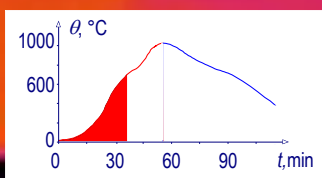
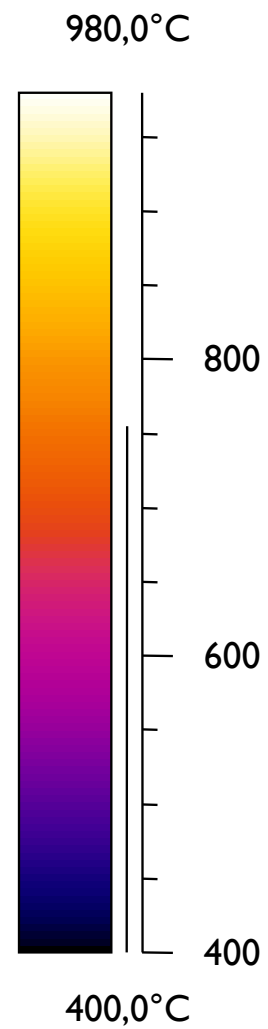
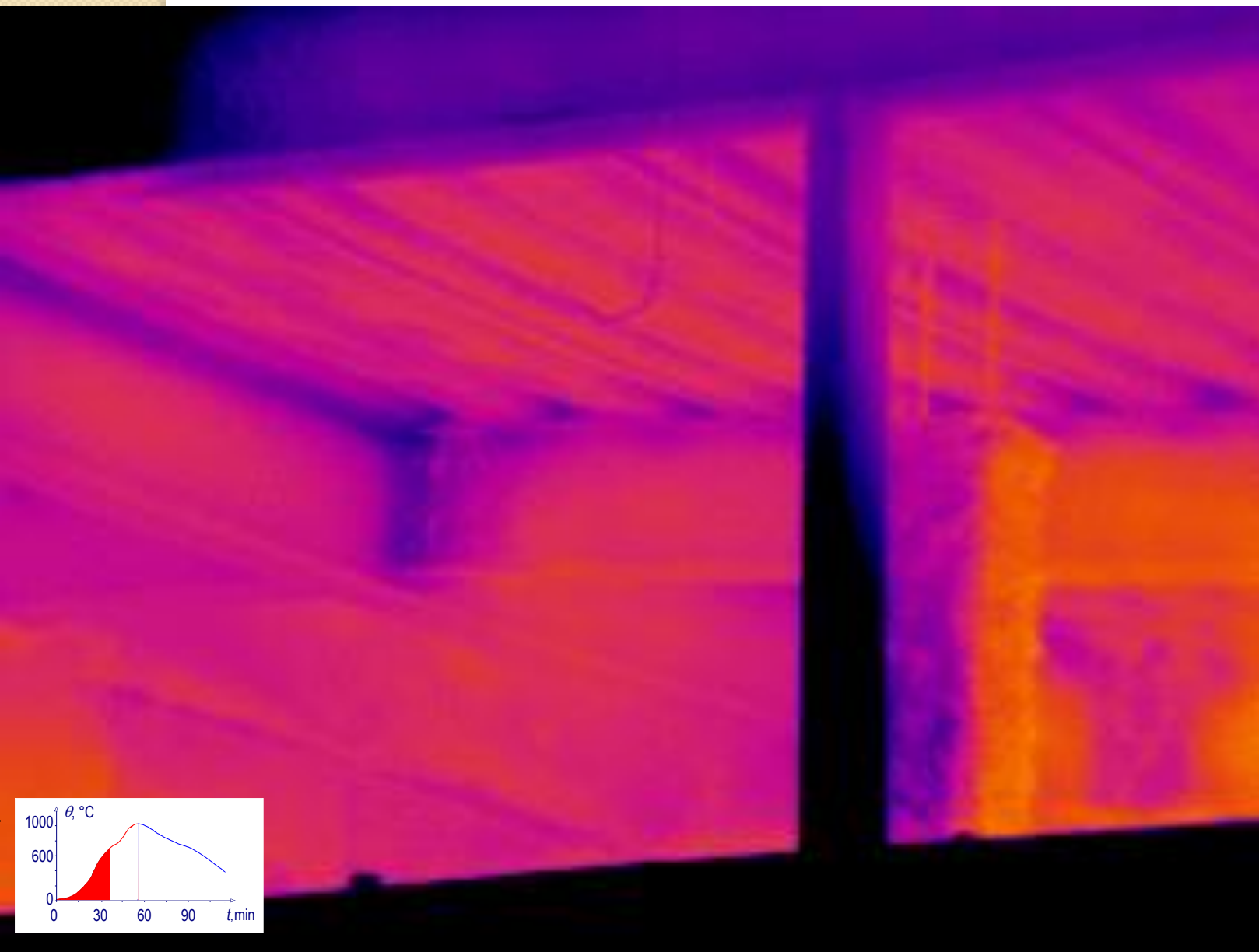
Gas temperature

$\theta, ^\circ\text{C}$  Heating

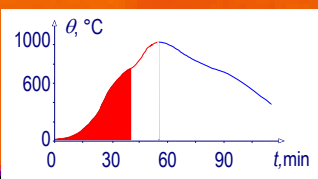
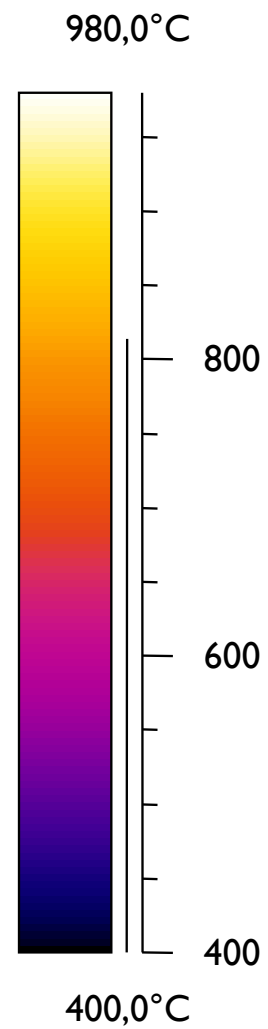
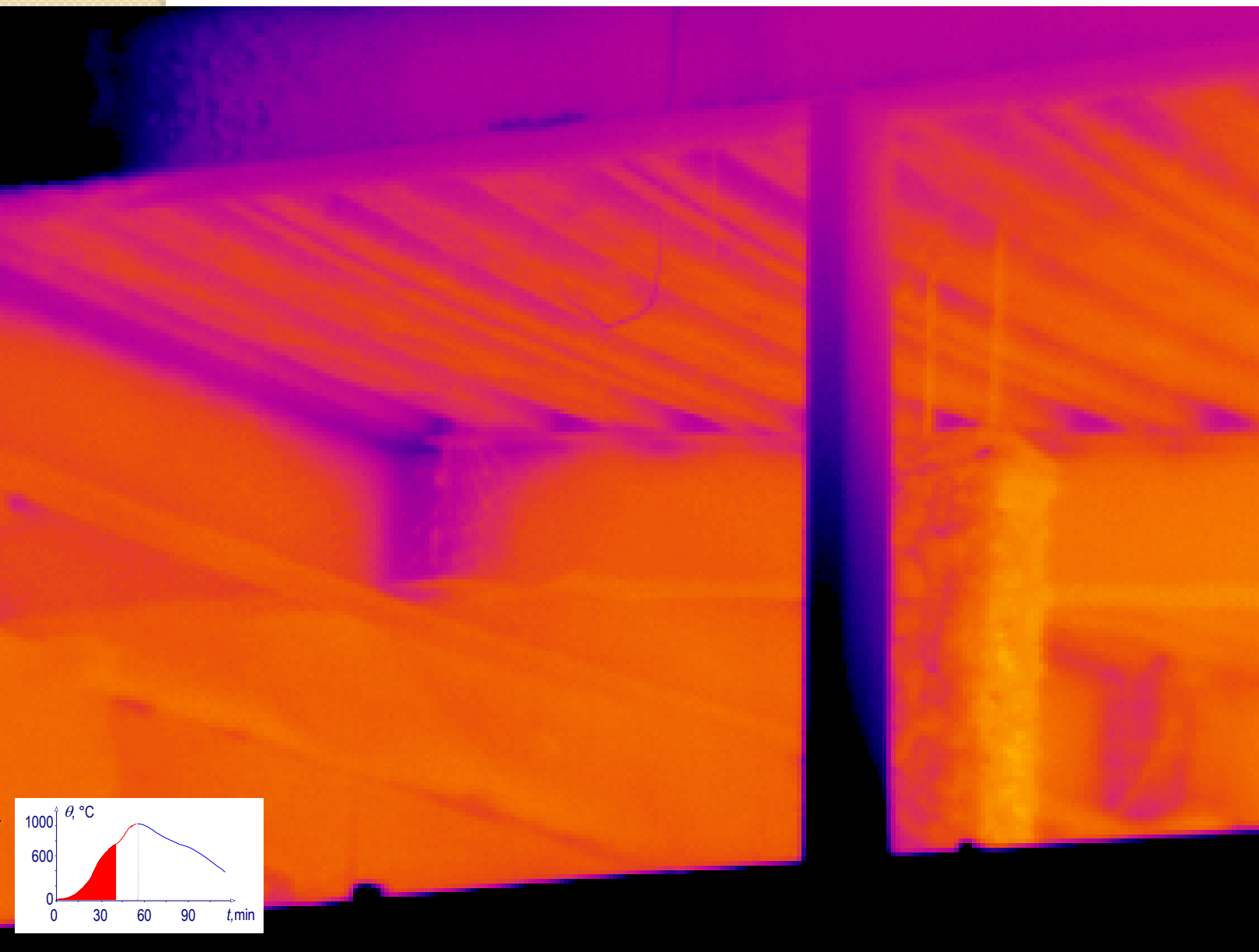
Time

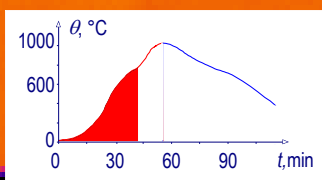
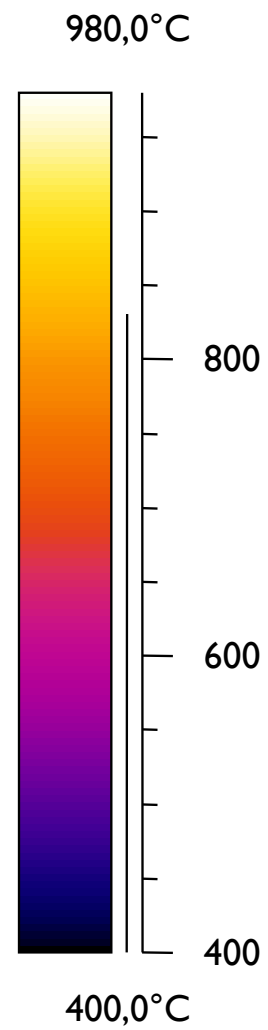
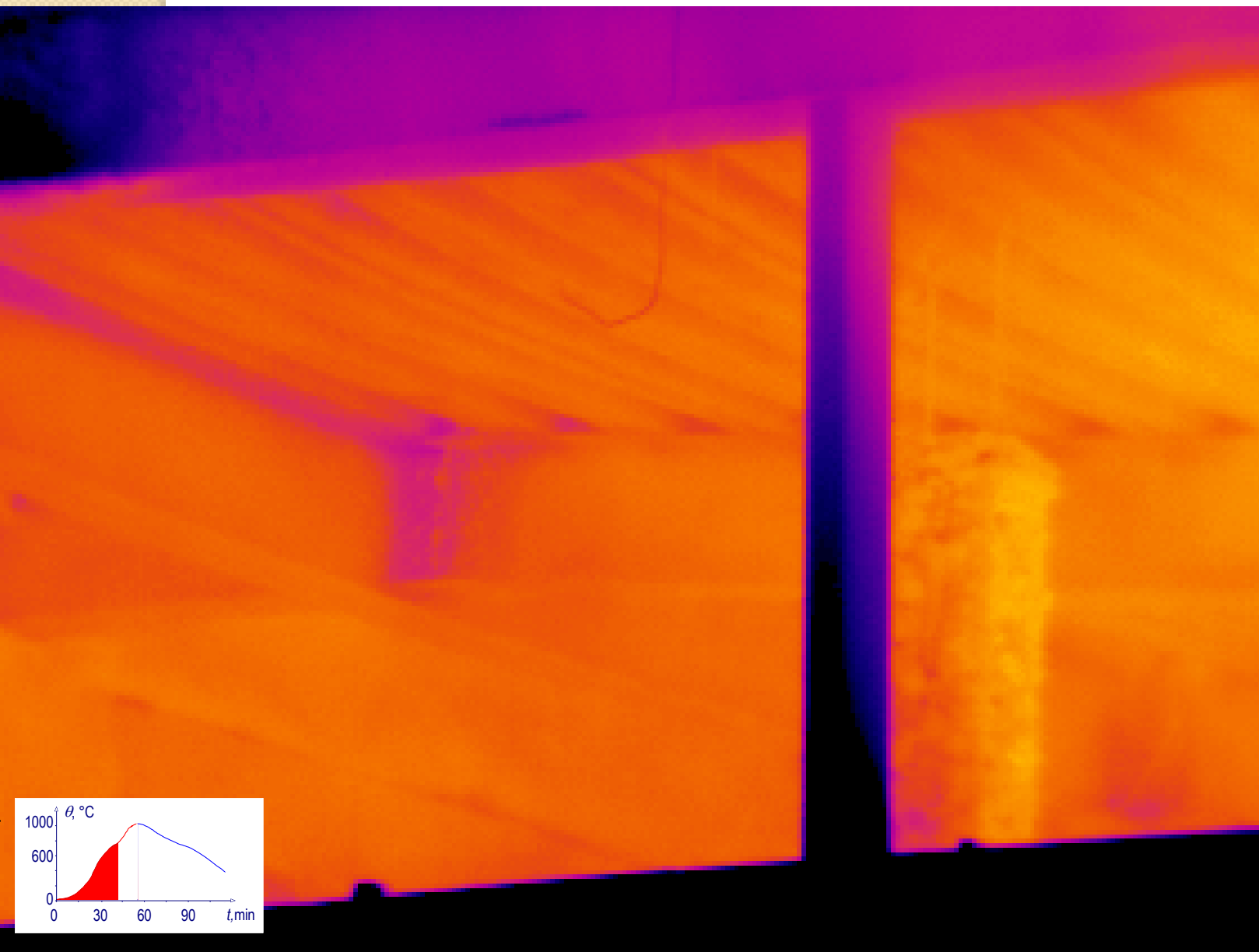


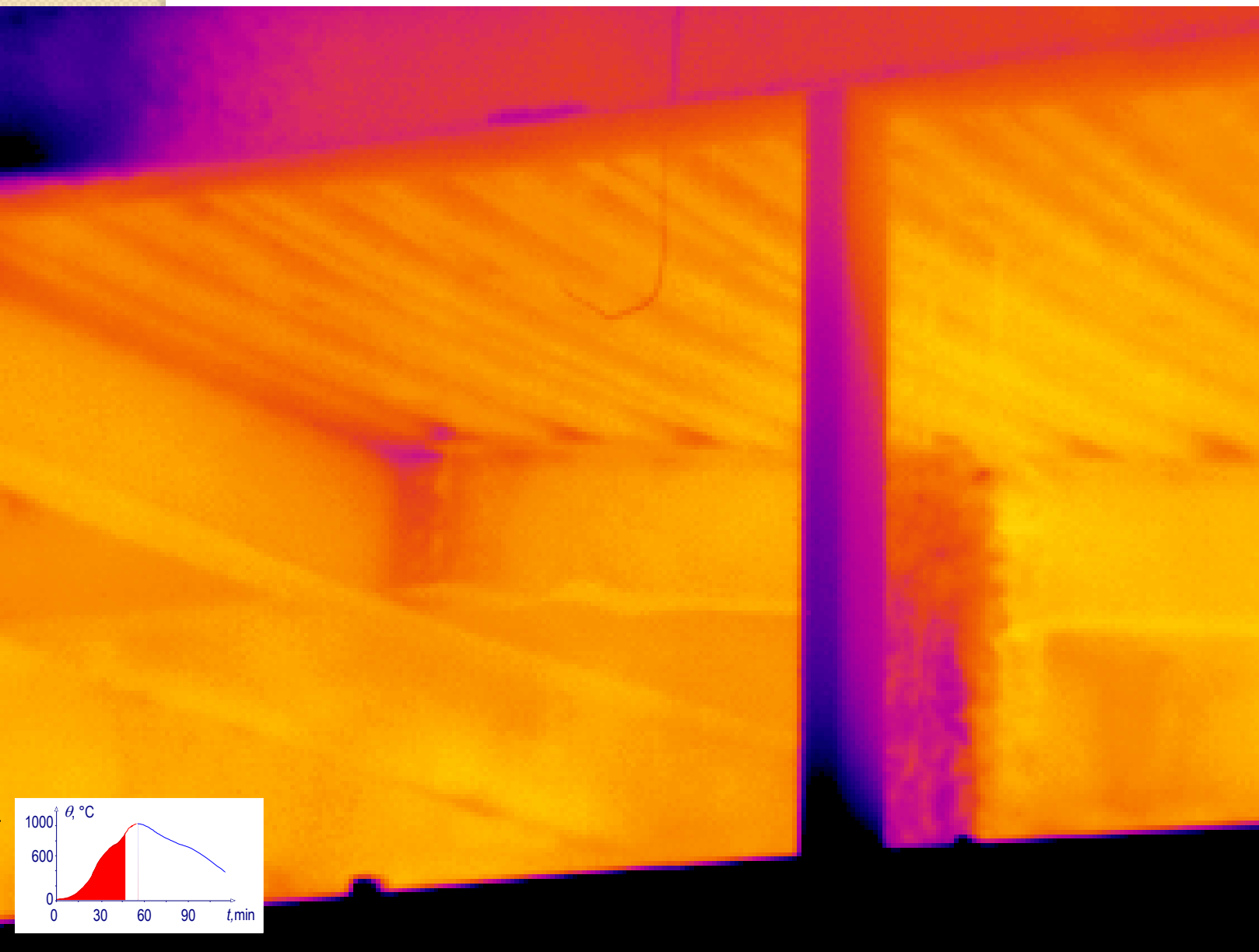












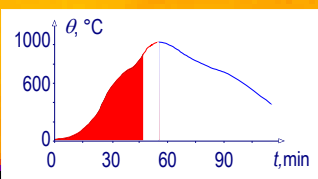
980,0°C

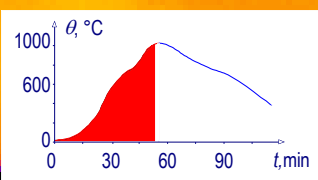
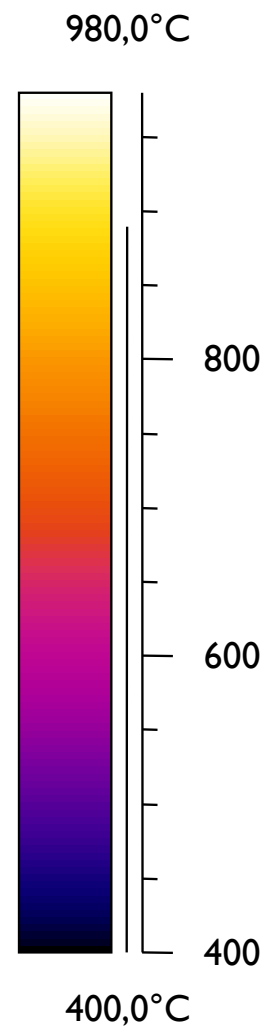
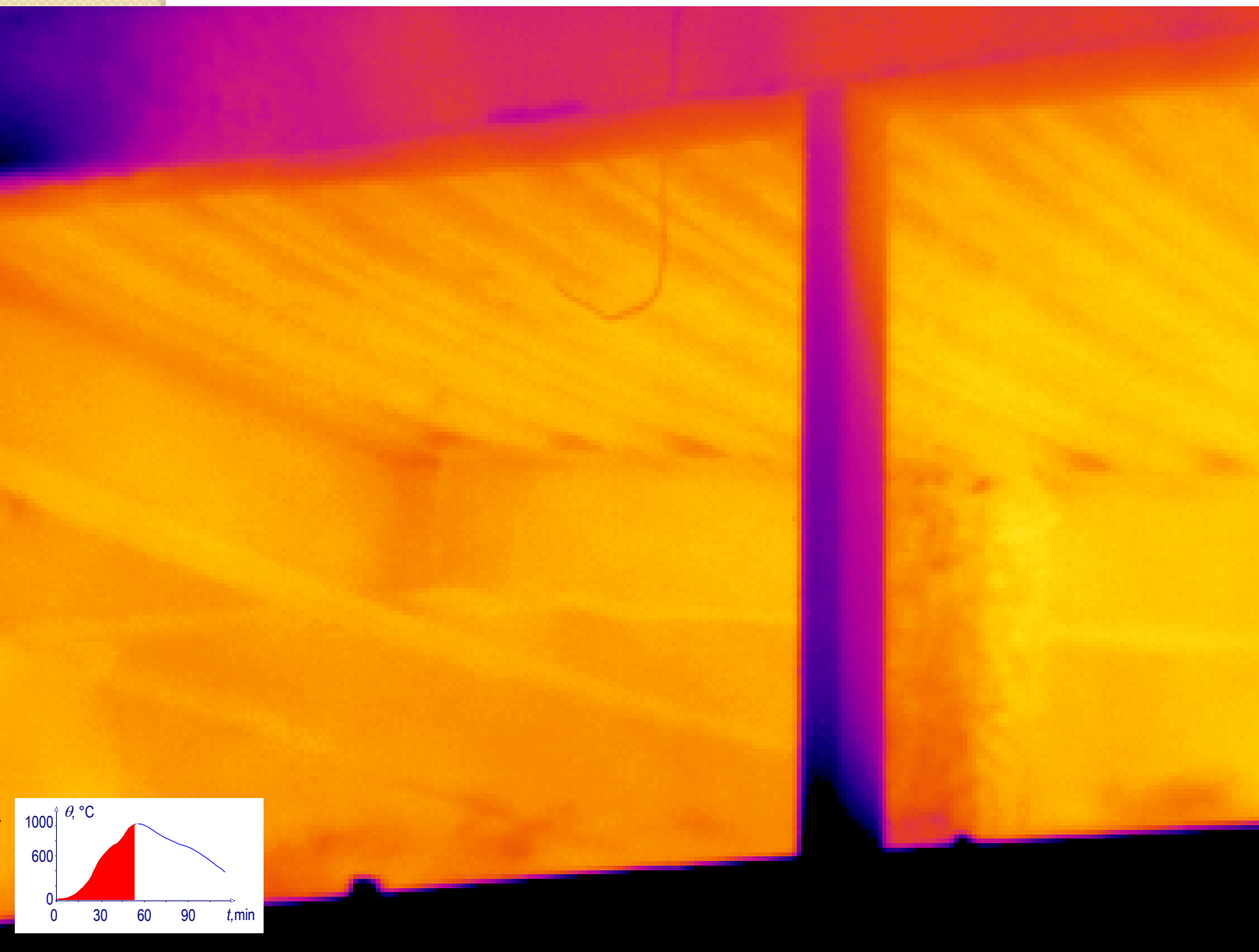
800

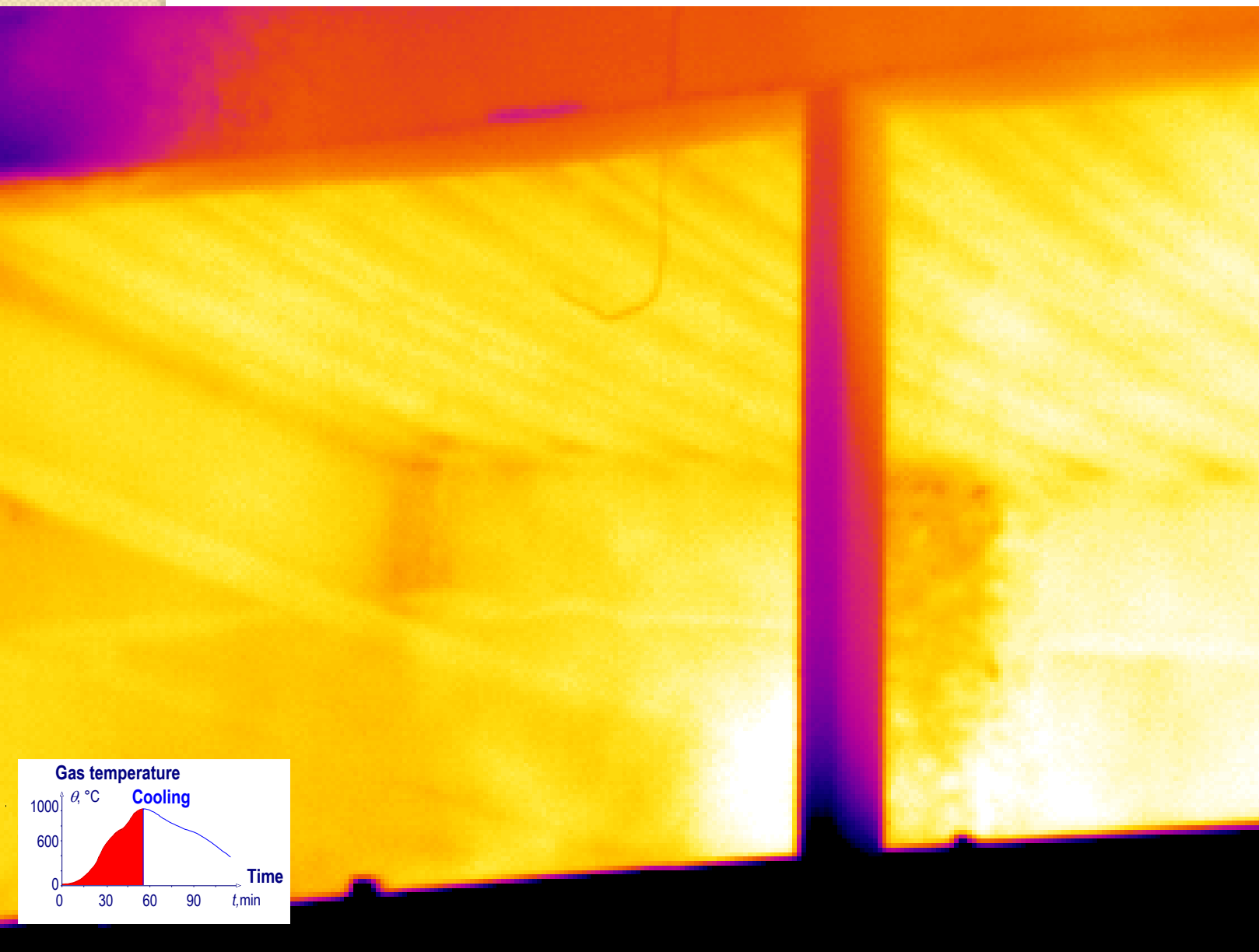
600

400

400,0°C







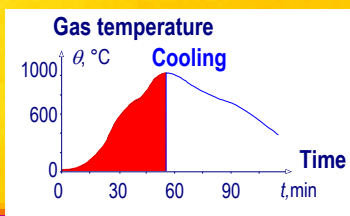
980,0°C

800

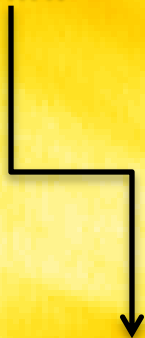
600

400

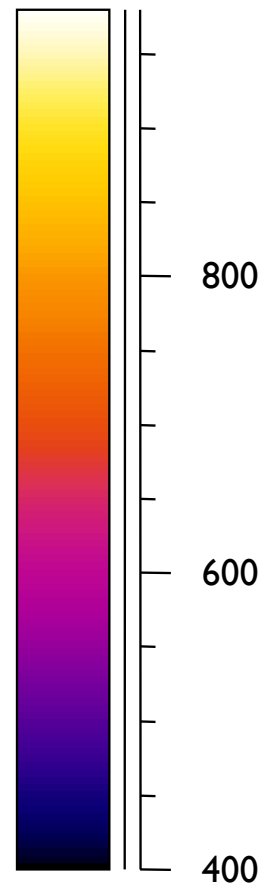
400,0°C



Največja temperatura 908,3°C  
dosežena po 63 min.



980,0°C

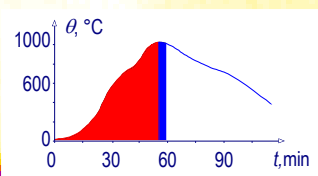


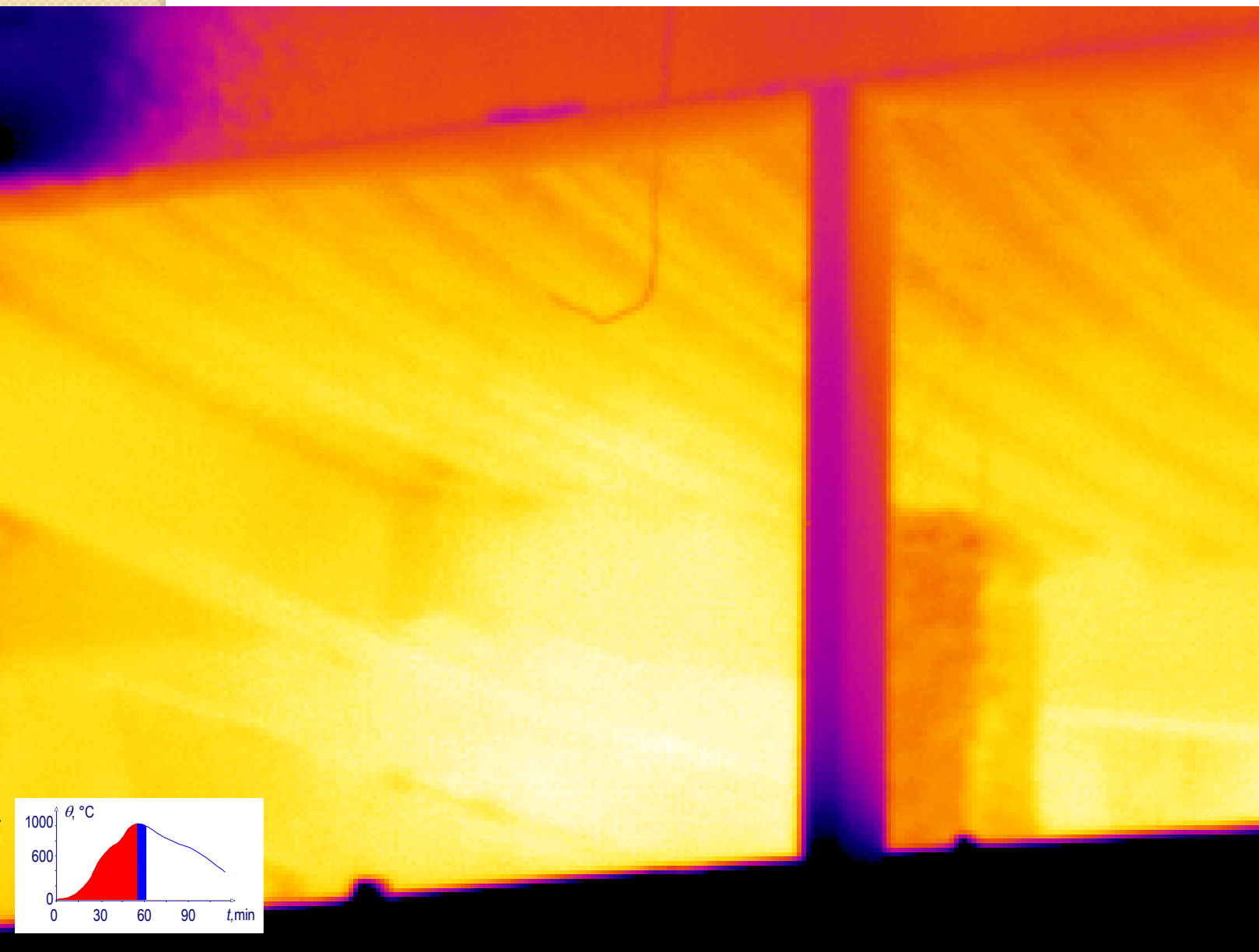
800

600

400

400,0°C





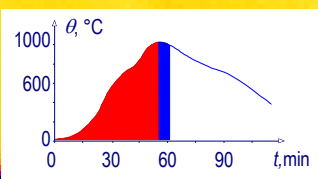
980,0°C

800

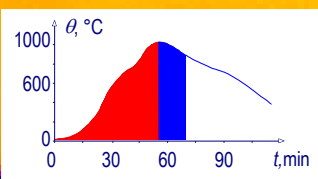
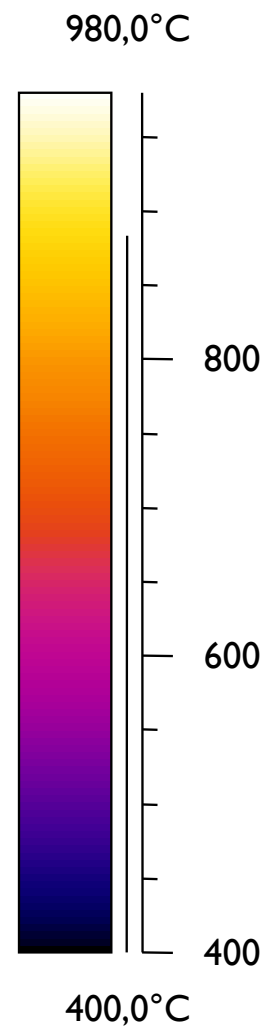
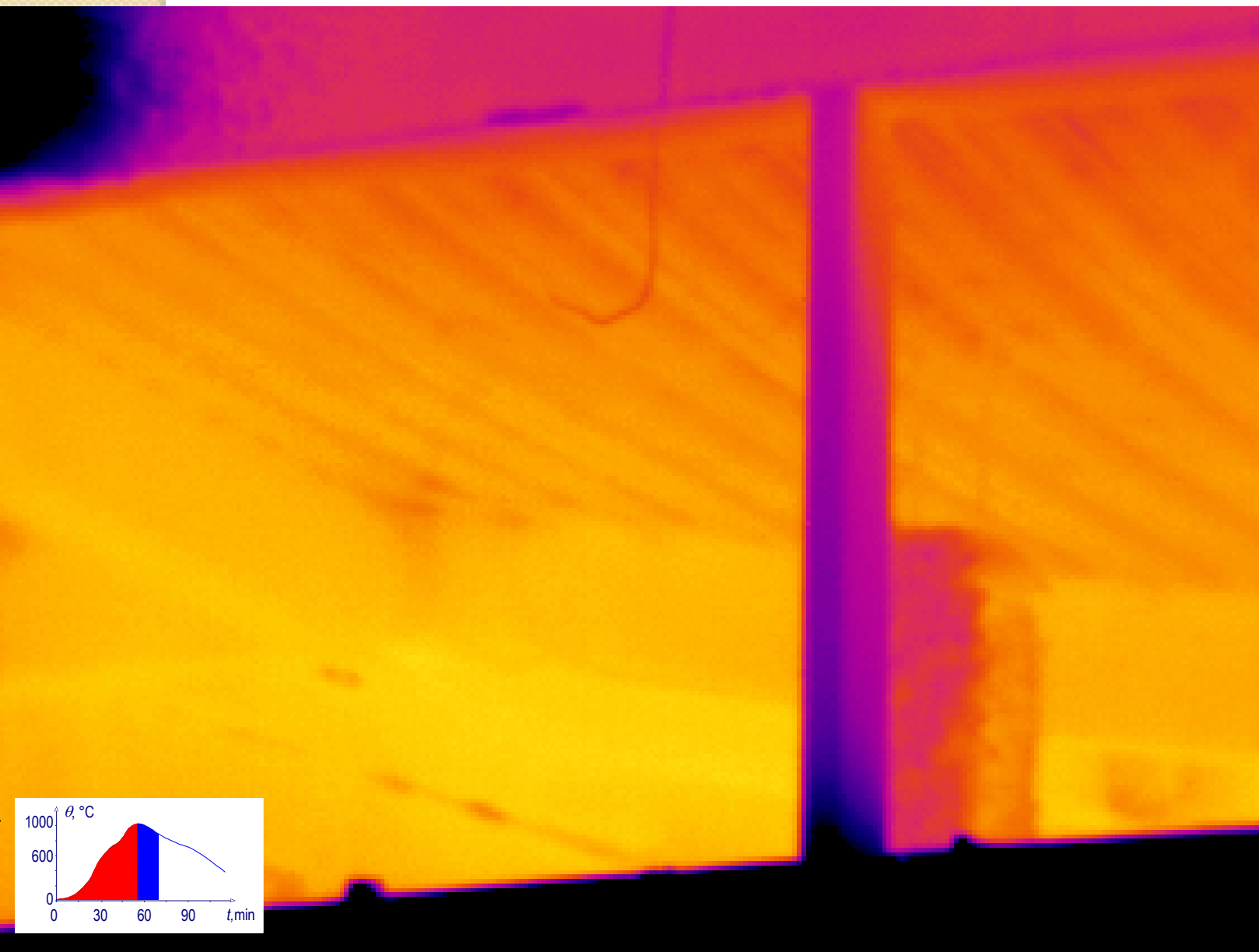
600

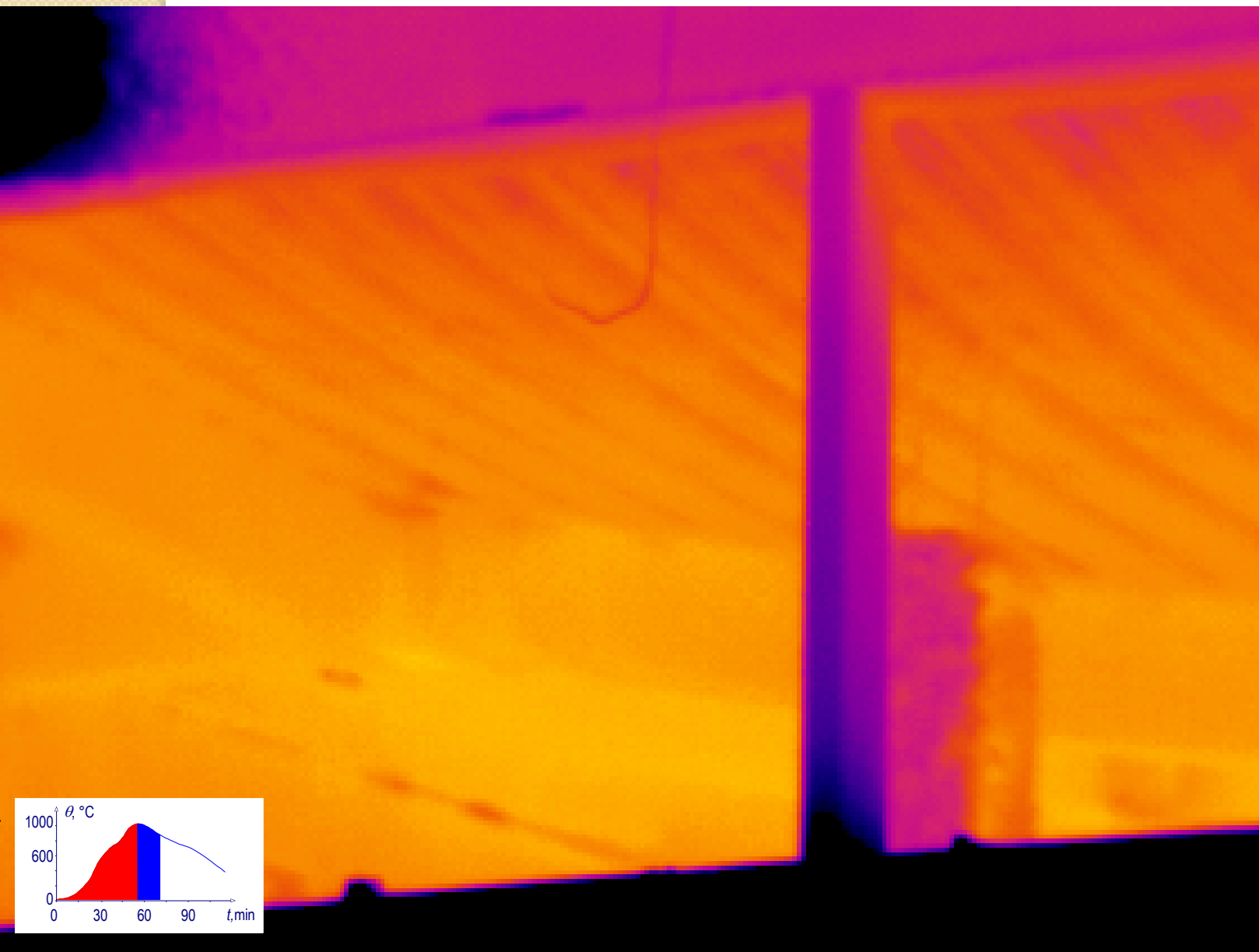
400

400,0°C









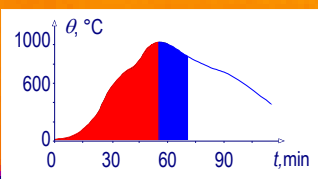
980,0°C

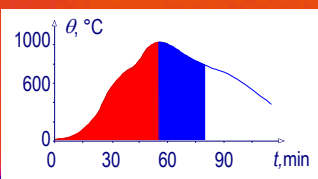
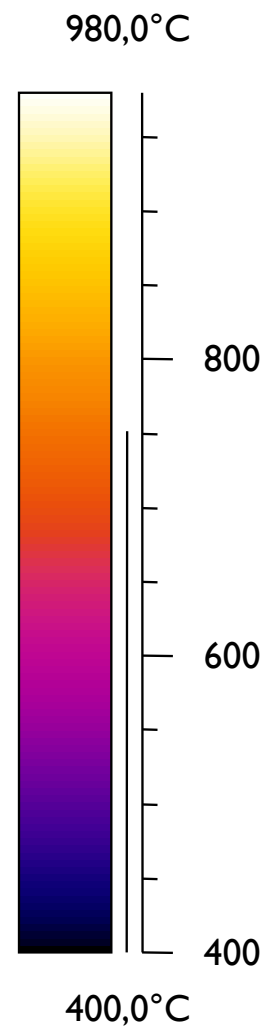
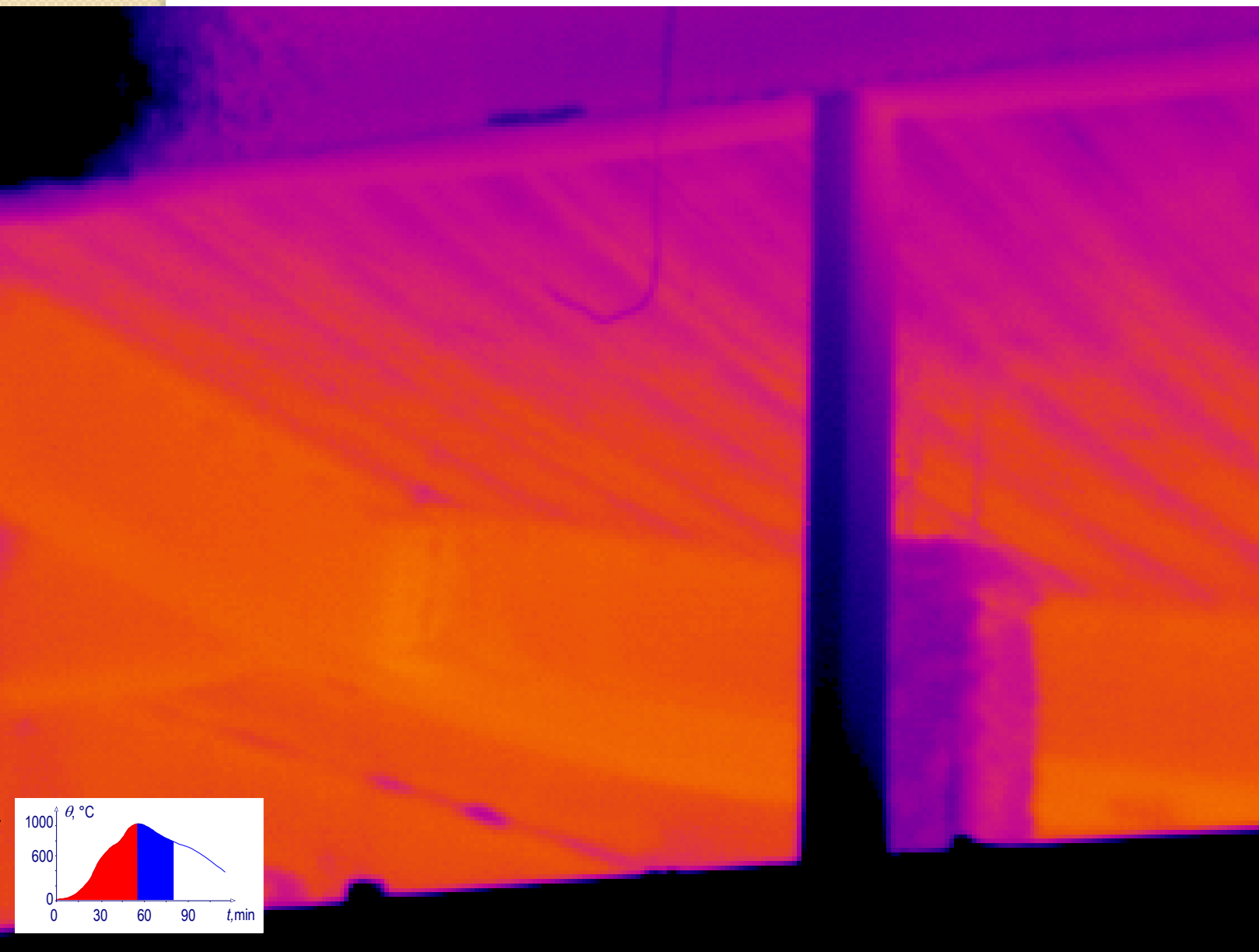
800

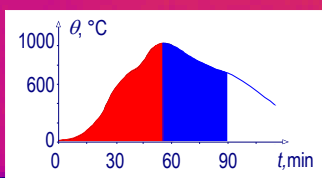
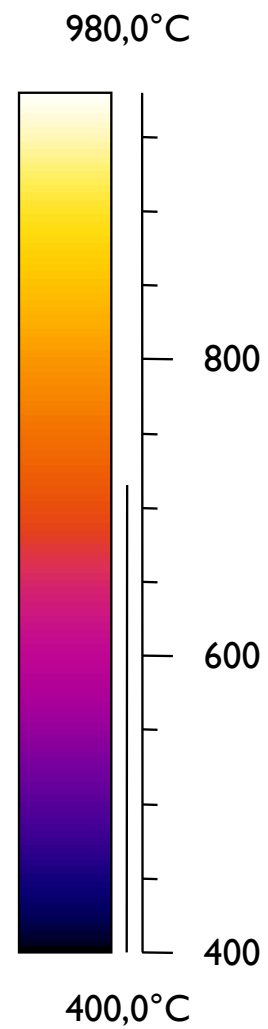
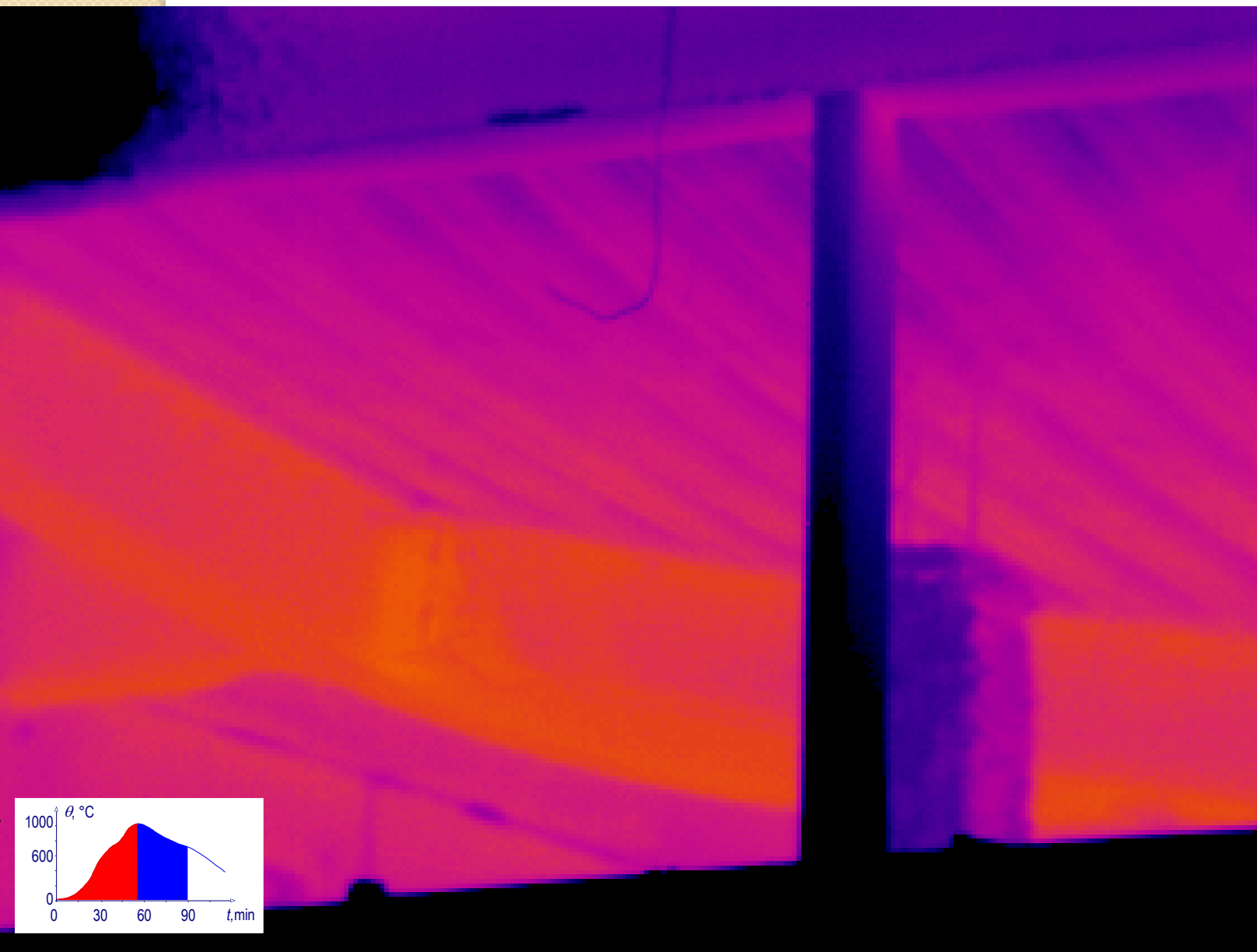
600

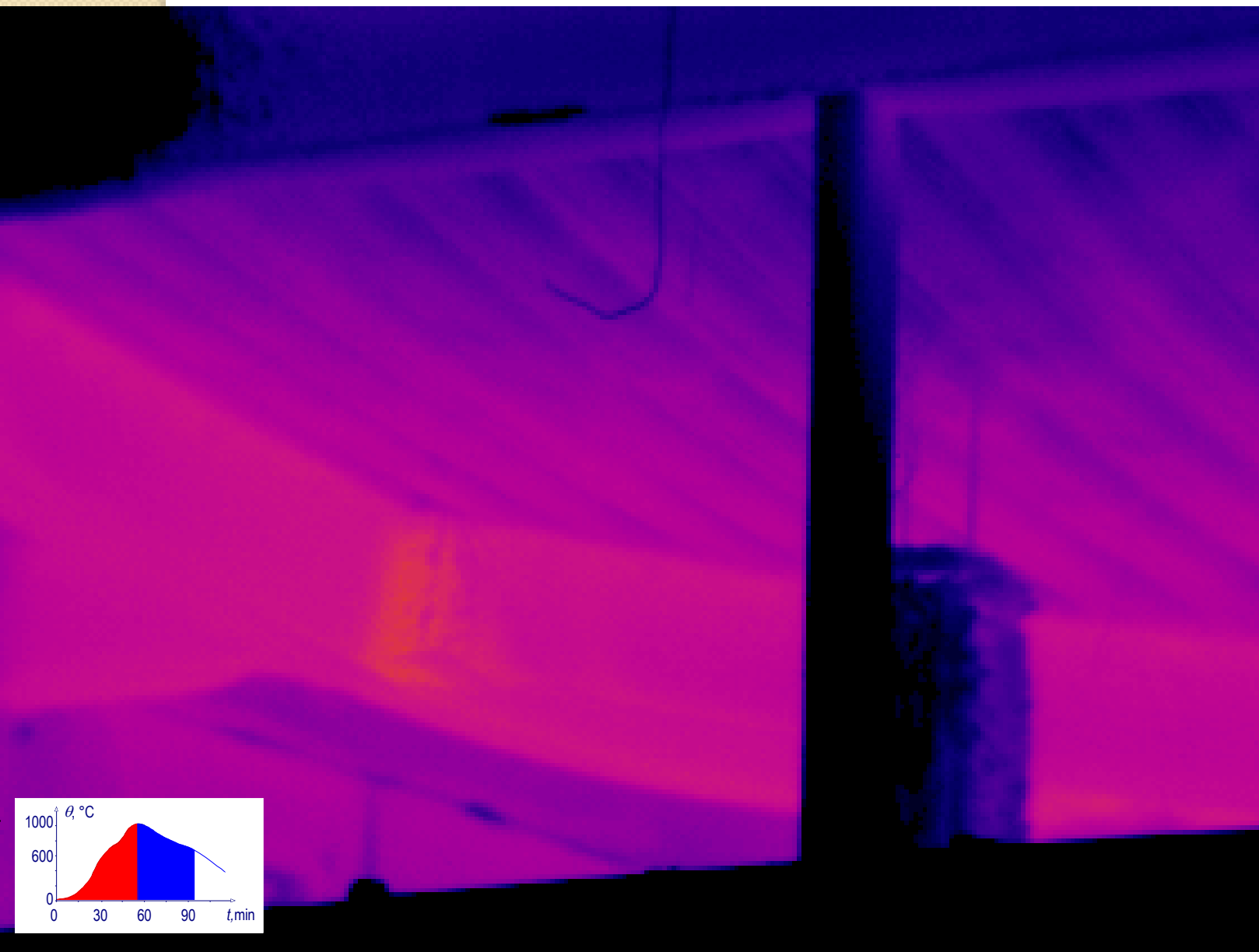
400

400,0°C









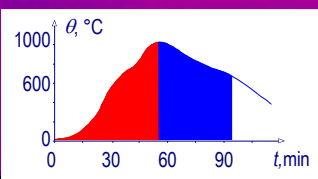
980,0°C

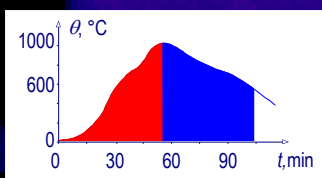
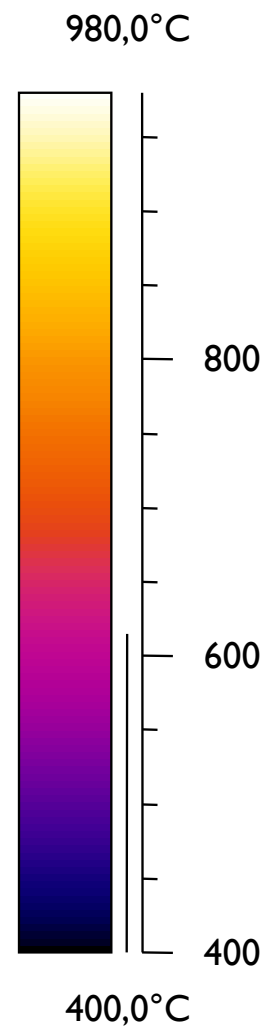
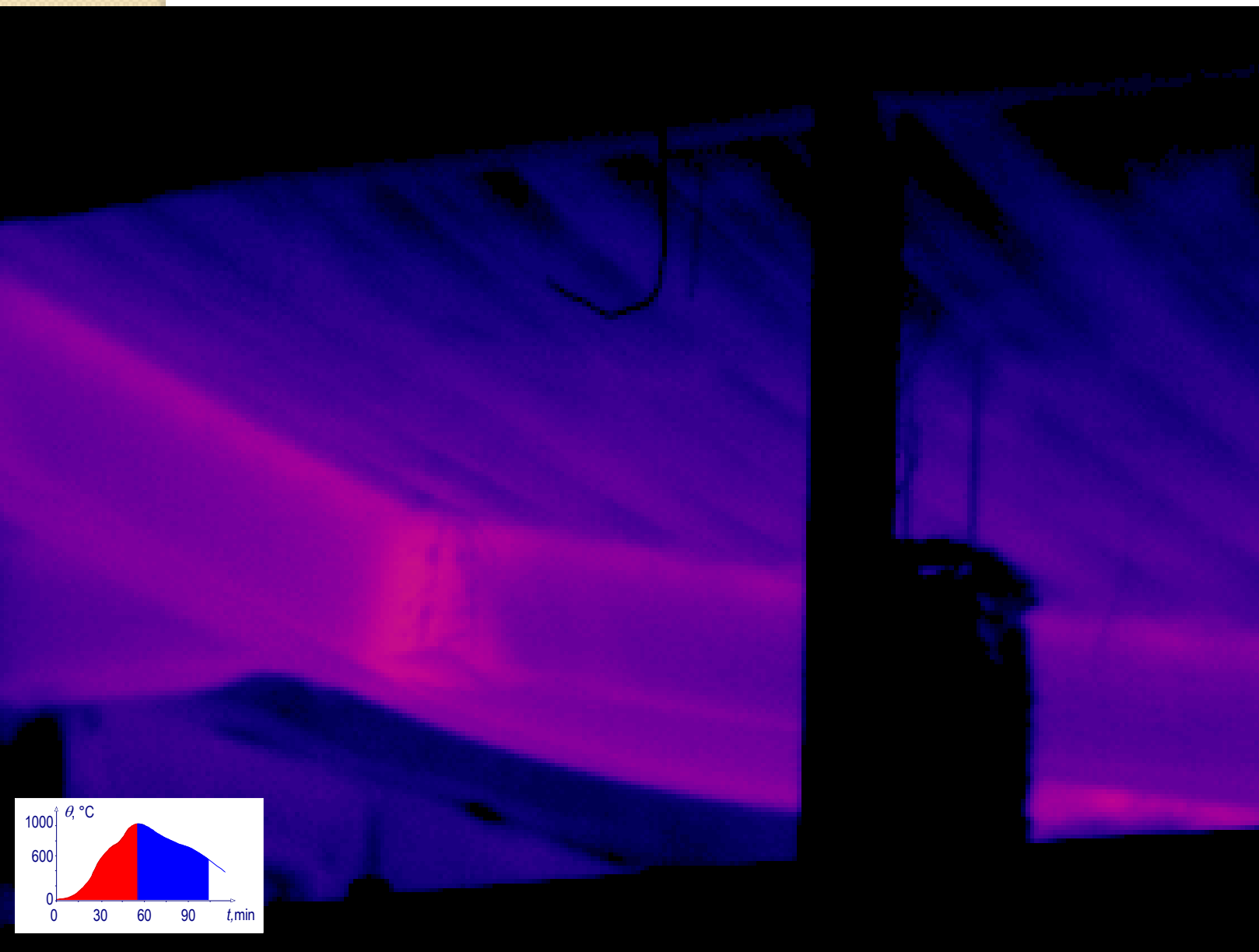
800

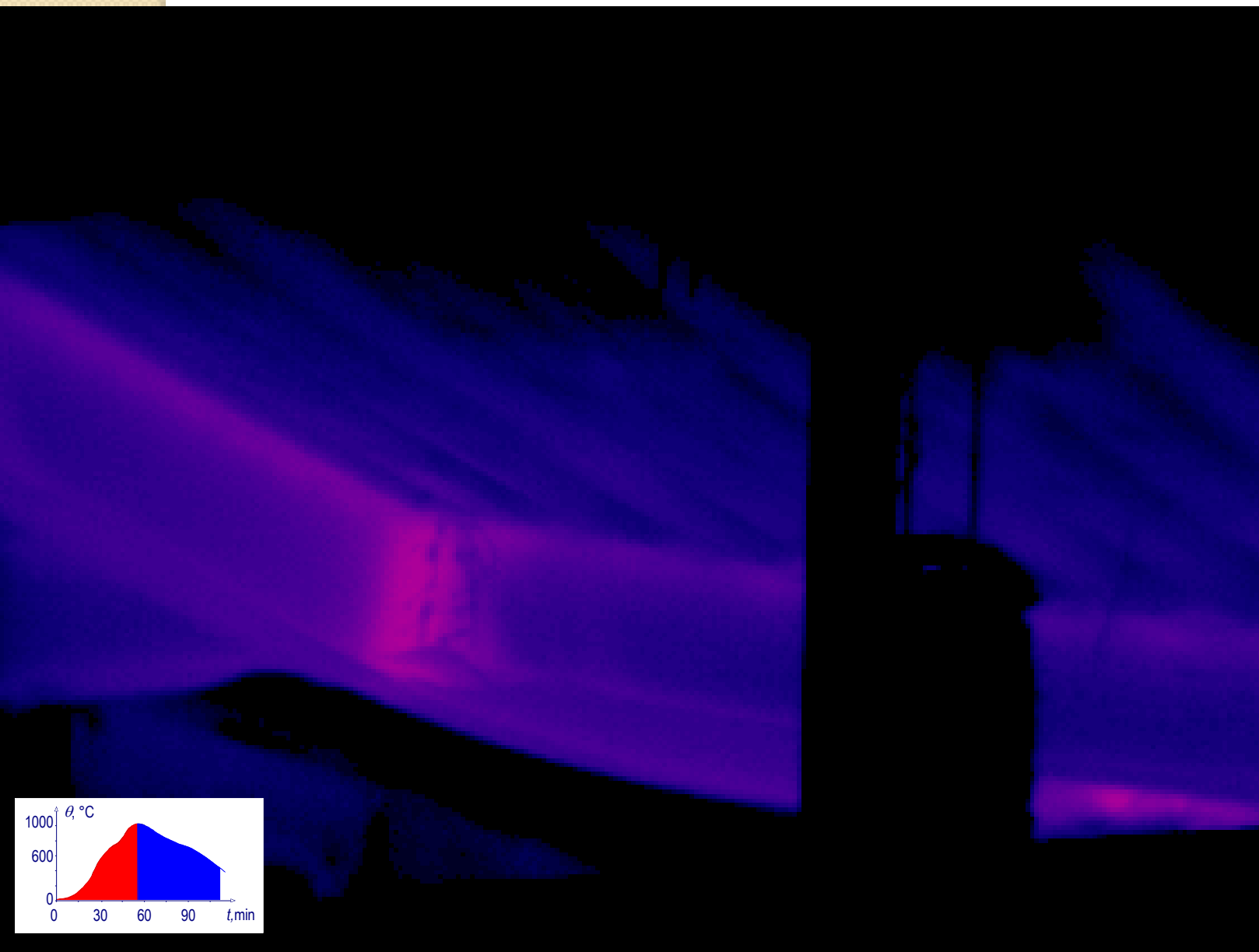
600

400

400,0°C







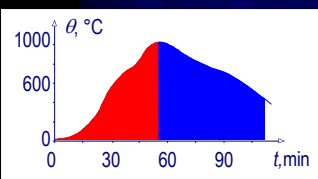
980,0°C

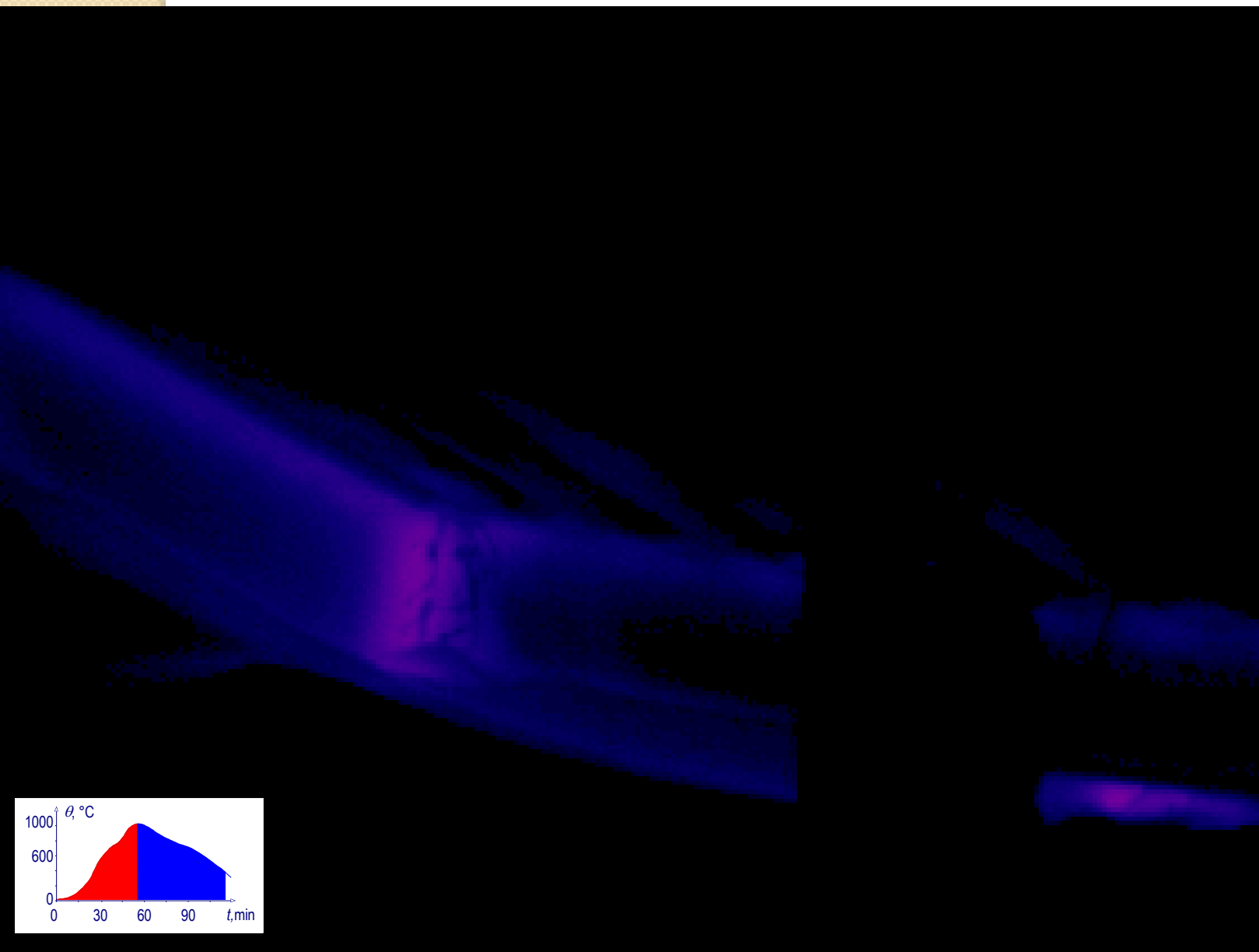
800

600

400

400,0°C





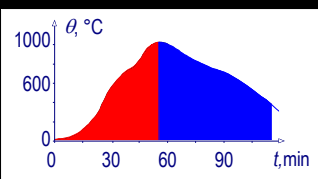
980,0°C

800

600

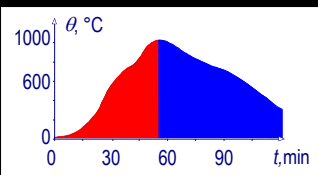
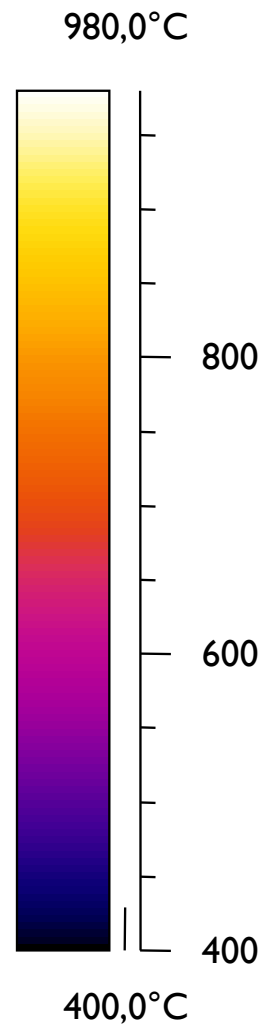
400

400,0°C

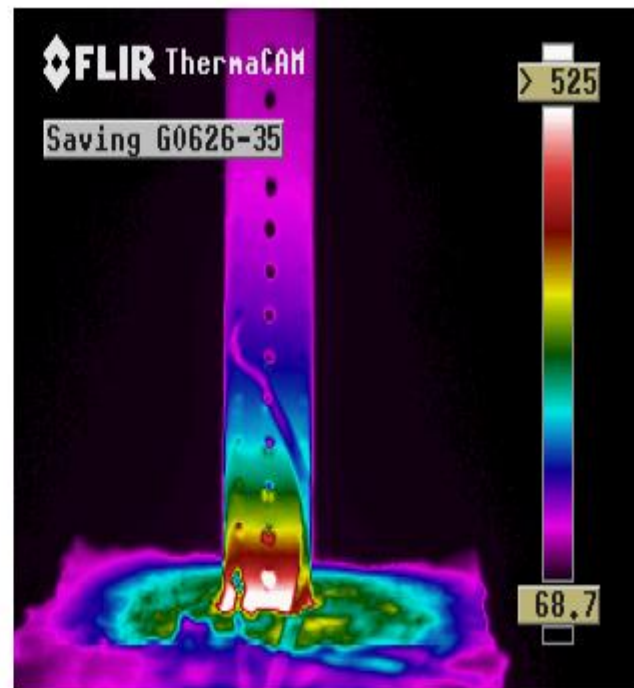




Po dveh urah požara temperatura v konstrukciji pade pod  $400^{\circ}\text{C}$ .



# Primer prenosa toplote v jeklenem elementu



# Osnove prenosa toplote

Način prenosa toplota

- KONDUKCIJA (trdna snov)
- KONVEKCIJA (tekočine, plini)
- RADIACIJA (valovanje)

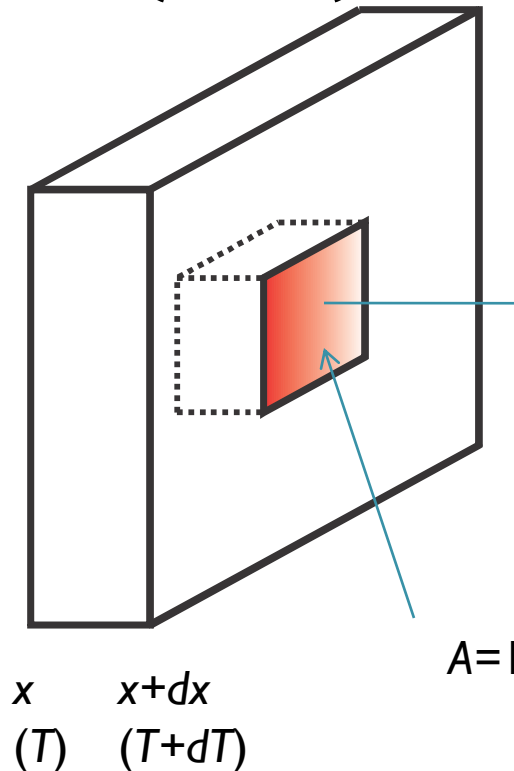
# Osnove prenosa toplote v primeru POŽARA

- **KONDUKCIJA** (trdna snov)
  - rešujemo ta problem
- **KONVEKCIJA** (tekočine, plini)
  - robni pogoj
- **RADIACIJA** (valovanje)
  - robni pogoj

# Fourierjeva enačba prevajanja toplote, stacionarno stanje

$$\frac{\dot{Q}}{A(A=1)} = q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Gostota toplotnega toka [W/m<sup>2</sup>]



$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Toplotna prevodnost snovi

# Toplotna prevodnost snovi $\lambda$

- Parameter  $\lambda$  (W/m ·K) je **toplotna prevodnost snovi**, ki je v splošnem **odvisna od vrste snovi, temperature in tlaka**.
- Pri zmernih tlakih je  $\lambda$  za trdne snovi, kapljevine in celo pline **odvisen le od temperature**.
- Kapljevine od 0,1 do 0,3 W/m ·K.
- Kovine med nekaj 10 do nekaj 100 W/m ·K.
- Primesi in nečistoče znižujejo prevodnost.
- Prevodnost čistih kovin z rastočo temperaturo praviloma pada.

# Toplotna prevodnost nekaterih materialov pri sobni temperaturi

| gradbeni material        | $\lambda$<br>(W/m·K) |
|--------------------------|----------------------|
| kamen - granit, marmor   | 2,8                  |
| - sadra                  | 2,15                 |
| beton - suh, penast      | 0,2                  |
| - gost, armiran          | 1,5                  |
| opeka - običajna         | 0,7                  |
| - votla, porozna         | 0,2                  |
| - polna, zelo gosta      | 1,2                  |
| notranji omet            | 0,7 ÷ 0,9            |
| zunanji omet             | 0,9 ÷ 1,2            |
| gips                     | 0,48                 |
| okensko steklo           | 0,78                 |
| pireks steklo            | 1,09                 |
| trd les                  |                      |
| - hrast - vzdolž vlaken  | 0,17                 |
| - radialno skozi letnice | 0,19                 |
| mehek les                |                      |
| - jelka - vzdolž vlaken  | 0,11                 |
| - radialno skozi letnice | 0,14                 |
| strešna lepenka          | 0,15 ÷ 0,35          |
| azbest                   | 0,16                 |
| plutovina                | 0,033 ÷ 0,039        |
| steklena volna           | 0,035 ÷ 0,055        |
| kamena volna             | 0,040                |
| stiropor                 | 0,036                |

# Notranja energija

Sprememba notranje energije zaradi segrevanja (oz. ohlajevanja) je enaka:

$$\dot{Q} = mc \frac{dT}{dt}$$

Specifična toplota  
snovi





# Specifična toplota snovi $c_p$

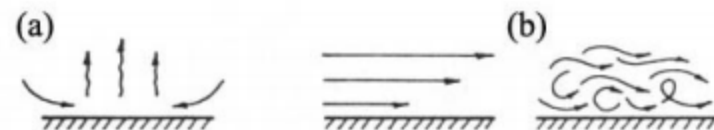
- Specifična toplota je v fiziki toplota, potrebna, da en kilogram snovi segrejemo za en kelvin [J/kgK]
- Pri homogenih telesih je specifična toplota enaka toplotni kapaciteti na enoto mase telesa.

| Snov  | $c_p$ [J/kgK] |
|-------|---------------|
| voda  | 4200          |
| jeklo | 450           |
| beton | 1000          |
| les   | 1360          |

# Prenos toplote med požarom

## KONVEKCIJA

- Ko je prvotno mirujoča tekočina v stiku s toplejšo površino, se njeni deli segrevajo, posledično pade njihova gostota, zato se zaradi vzgona pričnejo dvigati, na njihovo mesto pa doteka sveža tekočina - **naravna konvekcija (a)**.
  - Takšno gibanje makroskopskih delcev povzroči bistveno hitrejši prenos toplote, kot je sam prevod skozi tekočino.
- Ko je gibanje tekočine povzročeno npr. z mešalom, črpalko ali ventilatorjem, govorimo o **prisilni konvekciji (b)**.
  - Mešanje tekočinskih delcev se vrši predvsem zaradi vztrajnostnih sil, ki lahko prevladujejo nad vzgonskimi, zato je prestop toplote še intenzivnejši, kot pri naravni konvekciji.



# Prenos toplote med požarom

## KONVEKCIJA

- Zapišemo z enačbo (Newtonov zakon prestopanja toplote:

$$q = h(T_{fi} - T_s)$$

- $h$  – prestopni toplotni koeficient [ $W/m^2K$ ]
- $T_{fi}$  – temperatura zraka v okolici elementa
- $T_s$  – temperatura na površini elementa

- $h$  – *prestopni toplotni koeficient*  
[W/m<sup>2</sup>K]

| vrsta konvekcije             | $\alpha$ (W/m <sup>2</sup> K) |
|------------------------------|-------------------------------|
| naravna konvekcija plinov    | 2 ÷ 25                        |
| naravna konvekcija kapljevin | 50 ÷ 1000                     |
| prisilna konvekcija plinov   | 25 ÷ 250                      |
| prisilna konvekcija vode     | 250 ÷ 15 000                  |
| vrela voda                   | 2500 ÷ 25 000                 |
| kondenzirajoča para          | 5 000 ÷ 100 000               |

# Prenos toplote med požarom

## RADIACIJA

- Sevanje je elektromagnetno valovanje. Znotraj snovi se valovi absorbirajo, do izraza pa pridejo valovi, ki jih sevajo gradniki tik pod površjem snovi.
- Prenos toplote s sevanjem se razlikuje od konduktivnega in konvektivnega prenosa toplote
  - prvič po tem, da se lahko vrši tudi skozi prazen prostor in
  - drugič, da je prenesena toplota sorazmerna temperaturi na četrto potenco.
  - Čeprav pri sobni temperaturi seva vsaka snov, je večinoma potrebno sevalni prenos toplote pride do izraza pri **visokih temperaturah (požar)**.

# Prenos toplote med požarom

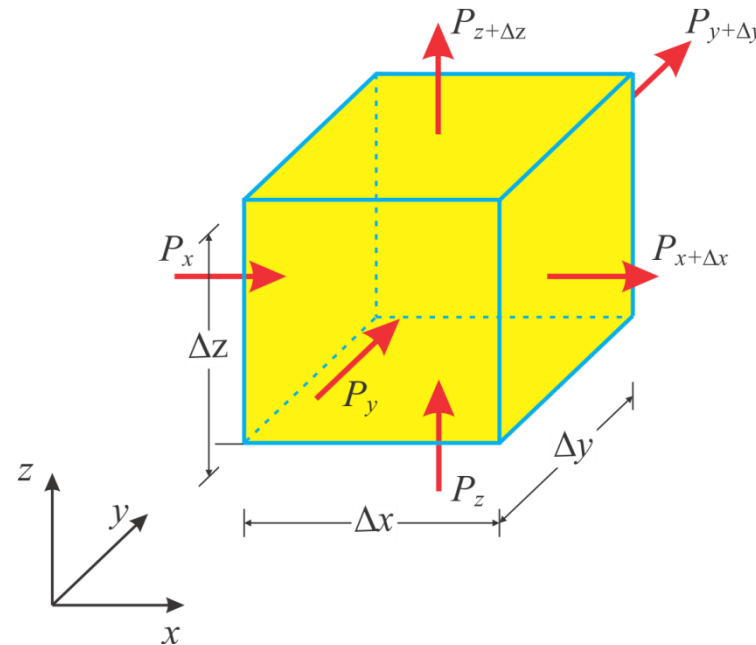
## RADIACIJA

- Stefanov zakon:

$$q = \sigma \varepsilon_{res} (T_{fi}^4 - T_s^4)$$

- $\varepsilon_{res}$  – resultirajoča emisivnost  $\varepsilon_{res} = \varepsilon_{fi} \varepsilon_m$
- $T_{fi}$  – temperatura zraka v okolici elementa
- $T_s$  – temperatura na površini elementa
- $\sigma$  – Stefan-Boltzmanova konstanta  
 $5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

# Prenos toplote po trdni snovi (kondukcija, nestacionarno stanje)



Zakon o ohranitvi energije (kocka velikosti  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ):

$$\left( \begin{array}{l} \text{Toplotni tok} \\ \text{pri } x, y, z \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{Toplotni tok} \\ \text{pri } x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Toplotni tok} \\ \text{zaradi toplotnega} \\ \text{vira v telesu} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Sprememba} \\ \text{notranje energije} \\ \text{zaradi segrevanja/ohlajanja} \end{array} \right)$$

# Fourierjeva parcialna diferencialna enačba za prenos toplote po trdni snovi (kondukcija)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{d\bar{Q}_n}{dt} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Posebni primeri enačbe

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{d\bar{Q}_n}{dt} = 0 \quad \text{Stacionarno stanje, (Poissonova En.)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Nestacionarno stanje brez notranjega vira, (Fourierova En.)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad \text{Stacionarno stanje brez notranjega vira, (Laplaceova En.)}$$



# Reševanje Fourierjeve parcialne diferencialne enačba za prenos toplote po trdni snovi (kondukcija)

Upoštevanje ustreznih začetnih in robnih pogojev

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$$

Kjer je  $T_0$  znana funkcija koordinat  $(x, y, z)$

Robni pogoji:

- predpisana temperatura
- predpisana gostota toplotnega toka
- konvekcija
- sevanje
- konvekcija+sevanje

# Reševanje Fourierjeve parcialne diferencialne enačba za prenos toplote po trdni snovi (kondukcija)

Robni pogoji, predpisana gostota temperaturnega toka

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \bigg|_{x_r, y_r, z_r} = q_z(t)$$

Poseben primer toplotno izolirana zunanja ploskev

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \bigg|_{x_r, y_r, z_r} = 0$$

Poseben primer, kontakt dveh teles A in B

$$q_A = q_B \xrightarrow{1D} -\lambda_A \frac{\partial T_A(x_c, t)}{\partial x} = -\lambda_B \frac{\partial T_B(x_c, t)}{\partial x}$$

$$T_A(x_c, t) = T_B(x_c, t)$$

# Robni pogoji, konvekcija in sevanje

The logo for the National Institute of Standards and Technology (NIST). It features the letters "NIST" in a stylized, white, sans-serif font with a slight 3D effect, set against a black background.

**National Institute of Standards  
and Technology  
Technology Administration  
U.S. Department of Commerce**

## Konvekcija

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \bigg|_{x_r, y_r, z_r} = h_c [T(x_r, y_r, z_r) - T_a]$$

Kjer je  $h_c$  prestopni koeficient.

SIST EN 1991-1-2, priporoča za normalne požare (ISO 834) vrednost 25 W/m<sup>2</sup>K, za CH-pa 50 W/m<sup>2</sup>K, za parametričen požar pa 50 W/m<sup>2</sup>K

## Sevanje

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \bigg|_{x_r, y_r, z_r} = \sigma e [T(x_r, y_r, z_r)^4 - T_r^4]$$

Kjer je  $T_r$  temperatura sevajočih predmetov v okolici,  $e$  pa rezultirajoča emisivnost.

$$e = e_m e_f \quad \text{SIST EN 1991-1-2}$$

# Reševanje enačbe prevajanja toplote po trdni snovi

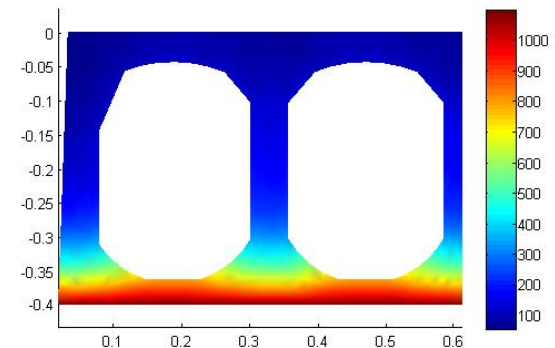
$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{d\bar{Q}_n}{dt} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Analitična rešitev običajno ni možna.

- posebni primeri:
  - stacionarno in nestacionarno prevajanje toplote skozi steno

Poslužujemo se numeričnih metod

- diferenčna metoda
- metoda končnih elementov
  - HeatC (FGG)
  - Josip (FGG)
  - MoistureHeat, Heatko, (FGG (MatLab))
  - mnogo komercialnih programov (Safir, Ansys, Comsol,....)



# Poseben primer, prenos toplote v jeklenih elementih

- Predpostavimo, da je temperatura v vsakem trenutku enakomerna po celotnem elementu konstrukcije.
- Predpostavimo, da je tudi temperatura v okolici obravnavanega elementa konstrukcije enakomerna in da je specifični površinski toplotni pretok konstanten po celotni površini elementa.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

$k_{sh}$

$A_m / V$

$A_m$

$V$

$c_a$

$\rho_a$

$\dot{h}_{net}$

$\Delta t$

korekcijski faktor za vplive zasenčenja,  
faktor prereza za nezaščiten jekleni element  
[m<sup>-1</sup>],

površina elementa na enoto dolžine [m<sup>2</sup>/m],

volumen elementa na enoto dolžine [m<sup>3</sup>/m],

specifična toplota jekla [J/kgK],

gostota jekla [kg/m<sup>3</sup>],

projektna vrednost neto toplotnega toka,

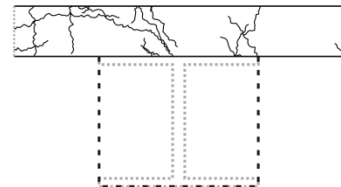
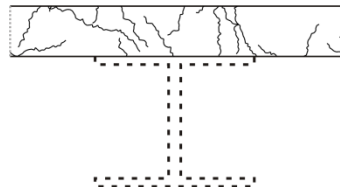
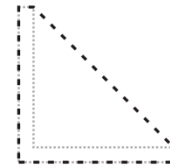
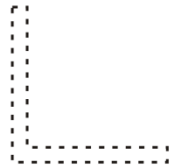
časovni interval [s].

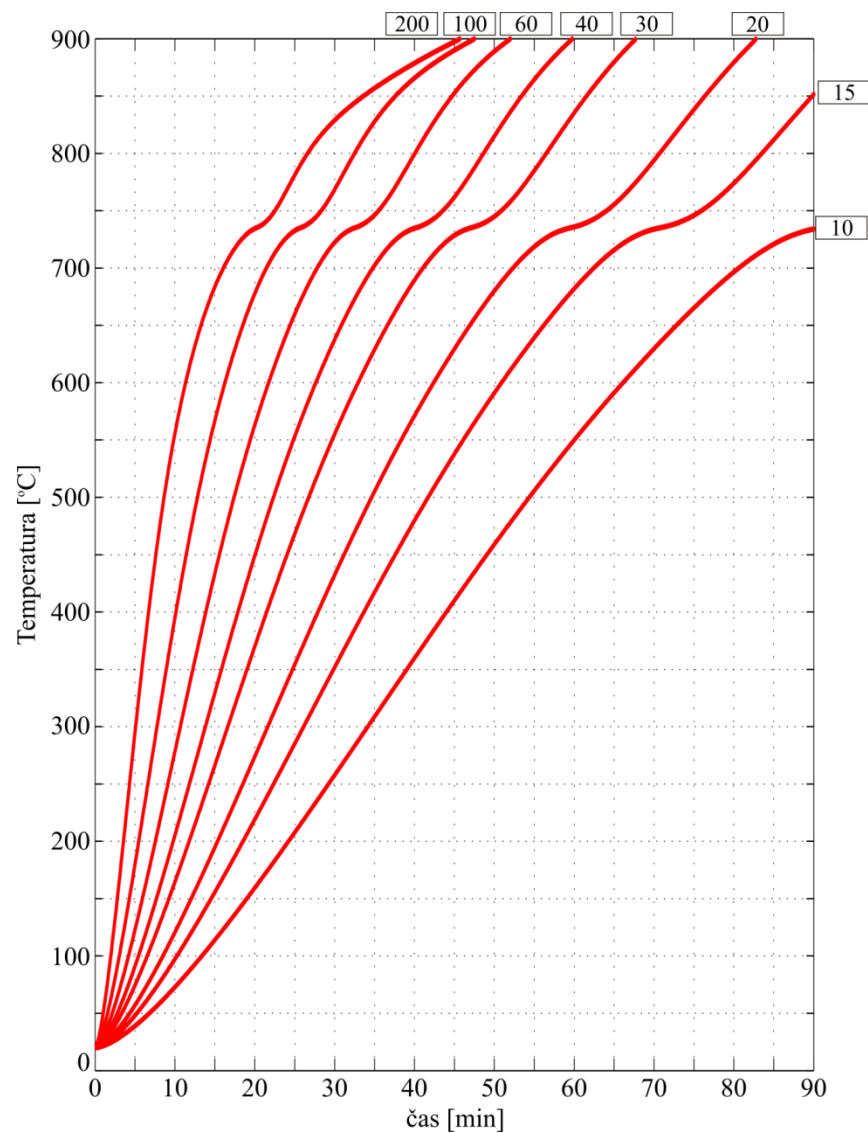
Površina prereza  $A_m$  in površina namišljene škatle  $A_{m,b}$

$A_m$



$A_{m,b}$





Časovni razvoj temperature nezaščitjenih jeklenih elementov izpostavljenim standardnemu požaru ISO 834 za različne faktorje prereza



# Poseben primer, prenos toplote v izoliranih jeklenih elementih

- Predpostavimo, da je temperatura v vsakem trenutku enakomerna po celotnem elementu konstrukcije.
- Temelji na več predpostavkah debelina izolacije je majhna (Wickstrom),

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + \phi / 3} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t},$$

- Pomen oznak na naslednjem slajdu.

# Pomen oznak

|                      |                                                                                                           |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_p / V$            | faktor prereza zaščitenega jeklenega elementa [ $\text{m}^{-1}$ ],                                        |
| $A_p$                | ustrezna površina materiala požarne zaščite elementa na enoto dolžine elementa [ $\text{m}^2/\text{m}$ ], |
| $V$                  | volumen elementa na enoto dolžine [ $\text{m}^3/\text{m}$ ],                                              |
| $c_a$                | specifična toplota jekla [ $\text{J/kgK}$ ],                                                              |
| $c_p$                | specifična toplota materiala za požarno zaščito [ $\text{J/kgK}$ ],                                       |
| $d_p$                | debelina materiala za požarno zaščito,                                                                    |
| $\Delta t$           | časovni interval [s],                                                                                     |
| $\theta_{a,t}$       | temperatura jekla v času $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ],                                                      |
| $\theta_{g,t}$       | temperatura plinov v požarnem sektorju v času $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ],                                 |
| $\Delta\theta_{g,t}$ | povečanje temperature plinov v požarnem sektorju v časovnem intervalu $\Delta t$ [K],                     |
| $\lambda_p$          | toplotna prevodnost sistema požarne zaščite [ $\text{W/mK}$ ],                                            |
| $\rho_a$             | gostota jekla [ $\text{kg/m}^3$ ],                                                                        |
| $\rho_p$             | gostota materiala požarne zaščite.                                                                        |

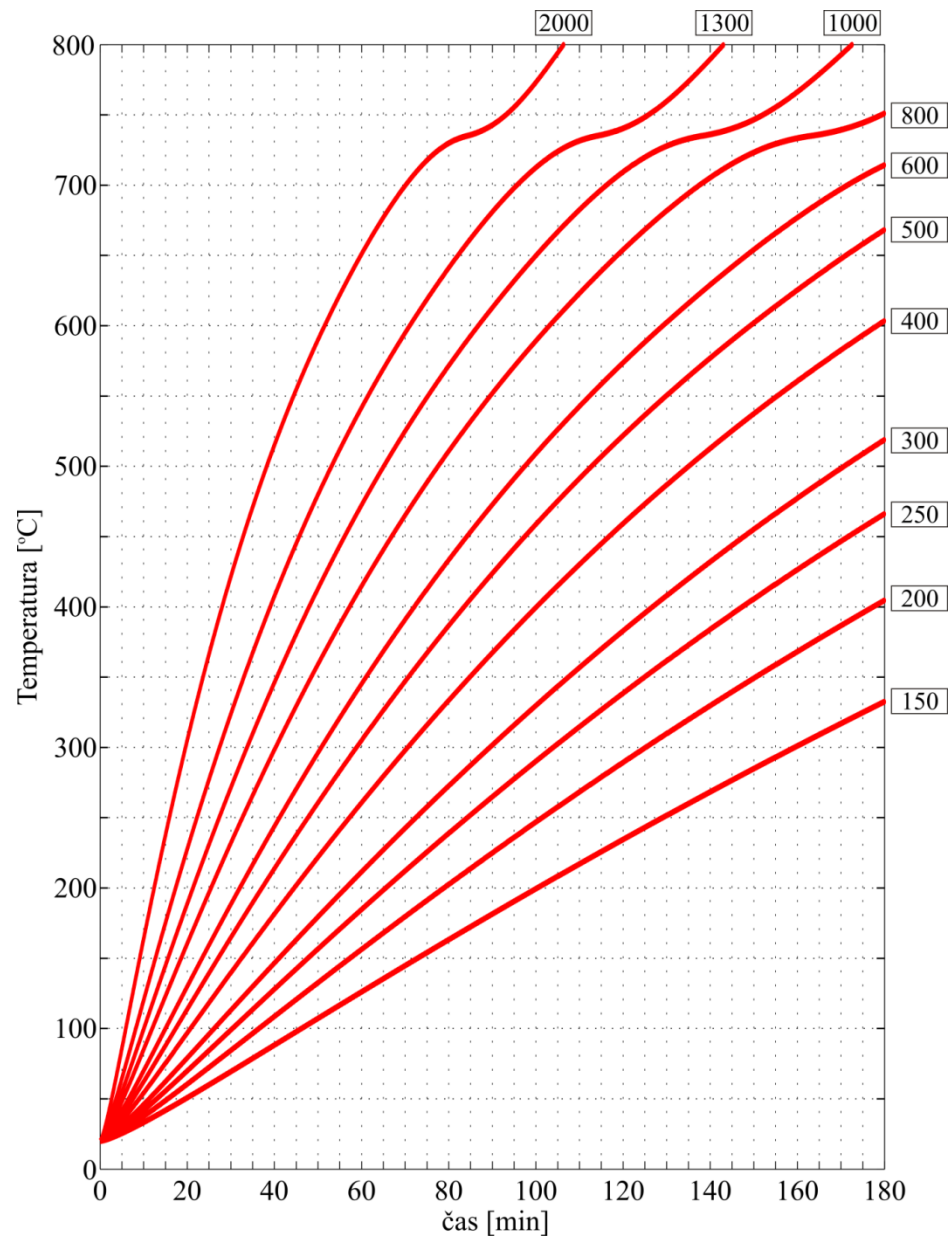
# Poseben primer, prenos toplote v izoliranih jeklenih elementih

- Enačbo lahko dodatno poenostavimo, s tem da zanemarimo specifično toploto materiala za požarno zaščito  $c_p$ , s tem je člen  $\Phi$ , ki nastopa v enačbi enak 0, in dobimo naslednjo poenostavljeno enačbo:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \rho_a} \Delta t.$$

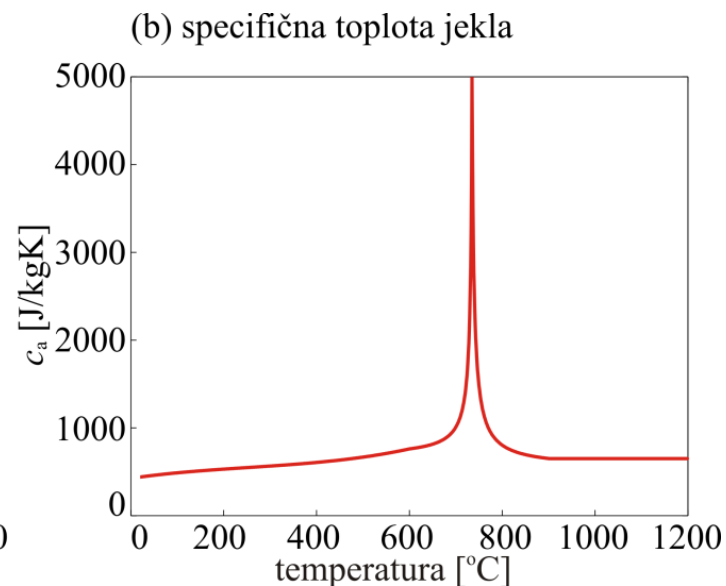
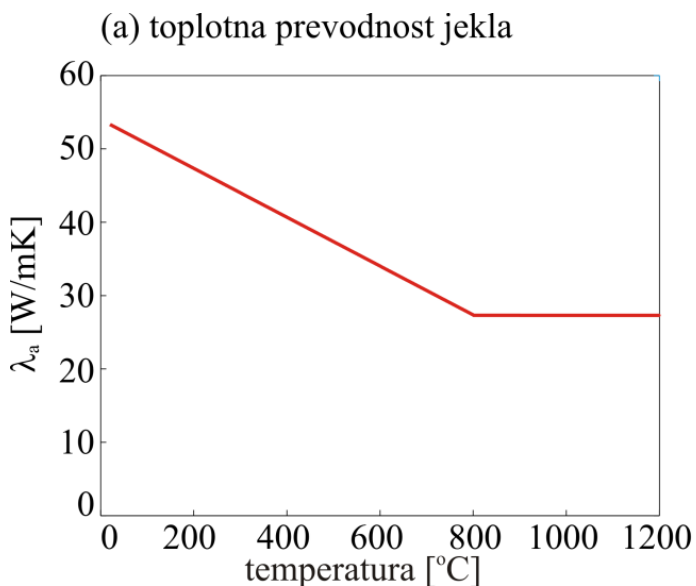
- Parametre, ki opisujejo jeklen prečni prerez in lastnosti materiala za požarno zaščito lahko združimo v en sam parameter

$$k_p = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V}.$$



Časovni razvoj temperature zaščenjenih jeklenih elementov izpostavljenim standardnemu požaru ISO 834 za različne faktorje  $k_p$  [W/m³K].

# Termične lastnosti jekla pri povišani temperaturi

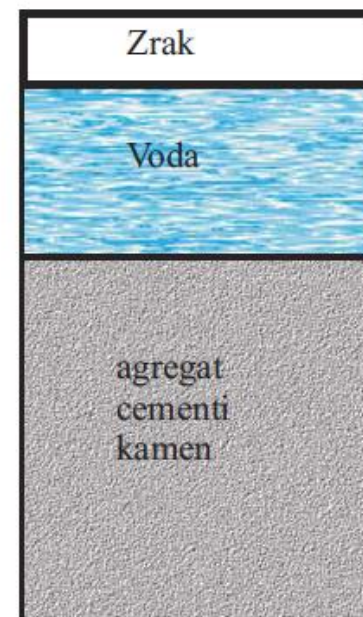
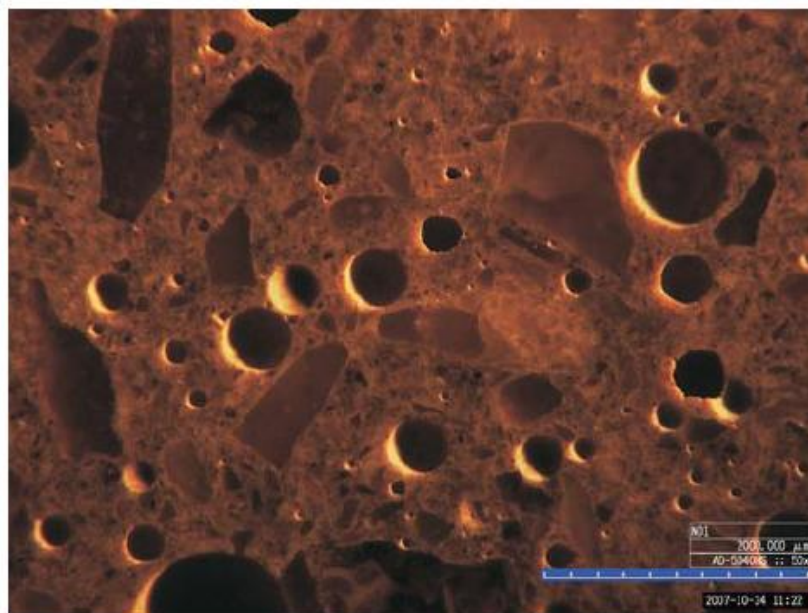


(a) Spreminjanje toplotne prevodnosti jekla v odvisnosti od temperature. (b) Spreminjanje specifične toplote jekla v odvisnosti od temperature.

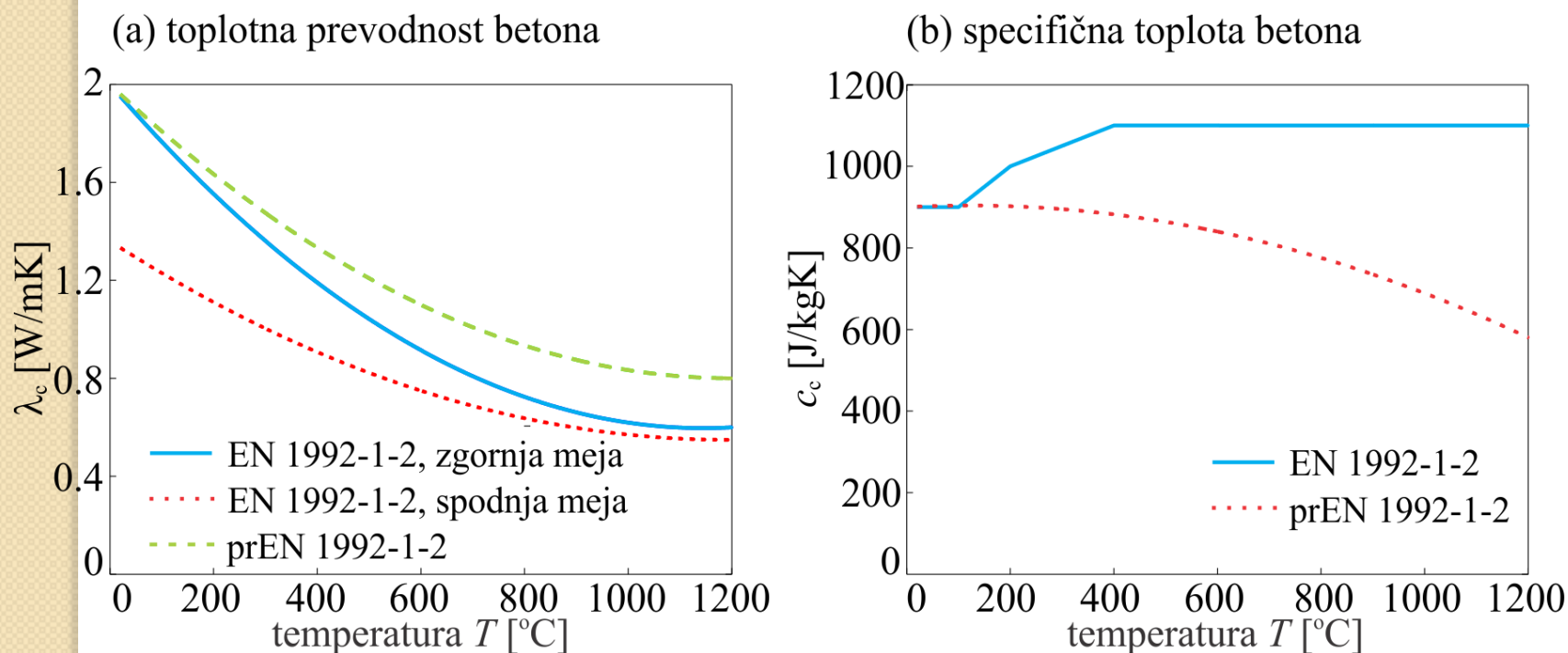
# Prenos toplote po betonskih elementih

Beton je porozen medij

*poleg prenosa toplote + masni prenos (vlaga)*

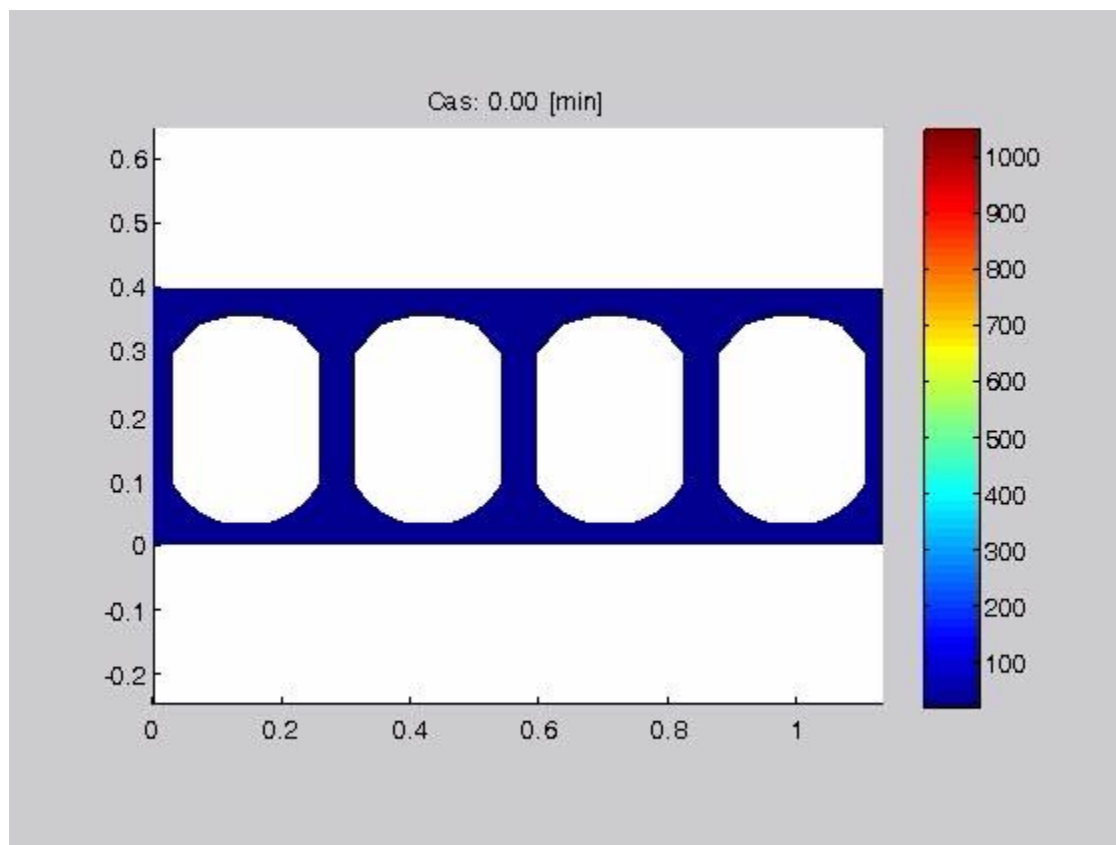


# Termične lastnosti betona pri povišani temperaturi



(a) Spreminjanje toplotne prevodnosti betona v odvisnosti od temperature. (b) Spreminjanje specifične toplote betona v odvisnosti od temperature.

# Razvoj temperatur po prečnem prerezu (program Heatko)





# Razvoj temperatur po prečnem prerezu (program Moisture Heat)

