

На входе в сопло Лавала водяной пар имеет параметры: $p_1 := 4 \text{ МПа}$ и $t_1 := 410 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление за соплом $p_{cp} := 0,5 \text{ МПа}$. Определить площадь минимального и выходного сечений сопла и скорость пара в этих $m := 2 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ а скоростной коэффициент сопла $\varphi := 0,92$. Определить также температуру пара на выходе из сопла. Начальной скоростью пренебречь.

Решение

Для определения термодинамических свойств водяного пара воспользуемся CoolProp

1) Определим с помощью CoolProp по $p_1 = 4 \cdot 10^6 \text{ Па}$ и $t_1 = 410 \text{ }^\circ\text{C}$ параметры водяного пара на входе в сопло Лавала:

$$h_1 := \text{CoolProp_Props} \left(\text{"H"}; \text{"P"}; p_1; \text{"T"}; t_1; \text{"Water"} \right) = 3238,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$s_1 := \text{CoolProp_Props} \left(\text{"S"}; \text{"P"}; p_1; \text{"T"}; t_1; \text{"Water"} \right) = 6,8061 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

Т.к. начальная скорость $w_1 := 0$ то $h_0 := h_1 = 3238,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ и $s_0 := s_1 = 6,8061 \frac{\text{Гр}}{\text{К}}$

2) Определяем режим течения, для чего рассчитываем β и сравниваем его с $\beta_{кр} := 0,546$

$$\left(\beta := \frac{p_{cp}}{p_1} \right) < \beta_{кр} = 1$$

для сопла Лавала это — расчетный режим (рис. 9.17), для которого в выходном сечении устанавливается давление

$$p_2 := p_{cp} = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

а в минимальном сечении

$$p_{кр} := \beta_{кр} \cdot p_1 = 2,184 \text{ МПа}$$

3) Предполагая, что процесс течения — изоэнтропный, определим по $p_{кр} = 2,184 \cdot 10^6 \text{ Па}$ и $s_{кр} := s_0 = 6,8061 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$

энтальпию водяного пара:

$$h_{кр} := \text{CoolProp_Props} \left(\text{"H"}; \text{"P"}; p_{кр}; \text{"S"}; s_{кр}; \text{"Water"} \right) = 3068,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

а по $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ и $s_2 := s_0 = 6,8061 \frac{\text{Гр}}{\text{К}}$ энтальпию водяного пара

$$h_2 := \text{CoolProp_Props} \left(\text{"H"}; \text{"P"}; p_2; \text{"S"}; s_2; \text{"Water"} \right) = 2741,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

в выходном сечении сопла Лавала. Скорость потока пара в минимальном и в выходном сечениях сопла рассчитываем по (9.46) в предположении, что трения нет:

$$w_{кр} := 44,72 \cdot \sqrt{\left(\frac{h_0 - h_{кр}}{1000} \right)} = 581,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$w_2 := 44,72 \cdot \sqrt{\left(\frac{h_0 - h_2}{1000} \right)} = 996,08 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Действительную скорость потока в рассчитываемых сечениях найдем, используя (9.16),

$$w_{крд} := \varphi \cdot w_{кр} = 535,35 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$w_{2д} := \varphi \cdot w_2 = 916,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

4) Для определения площади минимального и выходного сечений сопла Лавала определим энтальпии водяного пара по формуле (9.18) в состояниях крд и 2д (см. рис. 9.17) действительного процесса 0-2д:

$$h_{крд} := h_{кр} + (1 - \varphi^2) \cdot (h_0 - h_{кр}) = 3094,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{2д} := h_2 + (1 - \varphi^2) \cdot (h_0 - h_2) = 2818,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

По $p_{крд} := p_{кр} = 2,184 \text{ МПа}$ и $h_{крд} = 3094,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ найдём

$$v_{крд} := \text{CoolProp_Props} \left(\text{"D"}; \text{"P"}; p_{крд}; \text{"H"}; h_{крд}; \text{"Water"} \right)^{-1} = 0,12235 \frac{\text{м}}{\text{кг}}$$

По $p_{2д} := p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ и $h_{2д} = 2,8181 \cdot 10^6 \text{ Гр}$ найдём

$$v_{2д} := \text{CoolProp_Props} \left(\text{"D"}; \text{"H"}; h_{2д}; \text{"P"}; p_{2д}; \text{"Water"} \right)^{-1} = 0,40733 \frac{\text{м}}{\text{кг}}$$

$$t_{2д} := \text{CoolProp_Props} \left(\text{"T"}; \text{"H"}; h_{2д}; \text{"P"}; p_{2д}; \text{"Water"} \right) = 182,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Площадь минимального и выходного сечений сопла рассчитаем, используя уравнение неразрывности (9.30),

$$f_{min} := m \cdot \frac{v_{крд}}{w_{крд}} = 4,571 \text{ см}^2$$

$$f_2 := m \cdot \frac{v_{2д}}{w_{2д}} = 8,8899 \text{ см}^2$$

Ответ: В минимальном сечении: $f_{min} = 4,571 \text{ см}^2$ скорость пара $w_{крд} = 535,35 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ в выходном сечении: площадь

$$f_2 = 8,8899 \text{ см}^2 \text{ скорость пара } w_{2д} = 916,4 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ температура пара } t_{2д} = 182,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$