

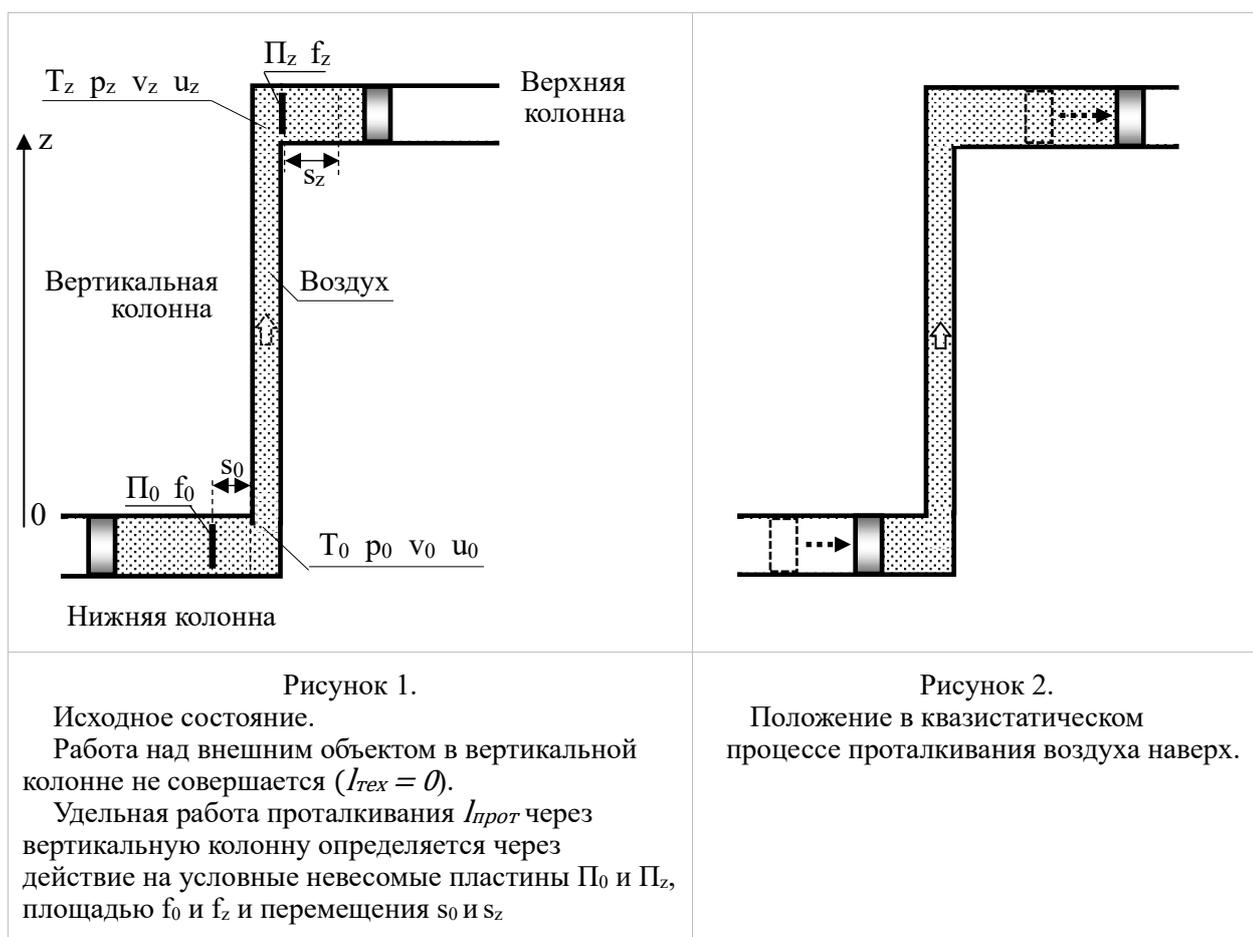
Проталкивание воздуха наверх в поле тяжести, показывающее неизотермичность воздуха по высоте

Филиппов Владимир Юрьевич, инженер
 Москва, 2018 - 28.02.2023 ruslabor@yandex.ru

Схема квазистатического проталкивания воздуха наверх в вертикальной адиабатической колонне дана на Рисунке 1 и Рисунке 2.

1. Проталкивание воздуха наверх в термодинамике потока [1].

Задача – найти выражение для градиента температуры $\frac{\Delta T}{\Delta Z}$



Первый закон термодинамики для потока (в нашем случае для вертикальной колонны)

$$q = \Delta u + l_{прот} + l_{тех} + \Delta e_{кин} + \Delta e_{пот} \quad (1)$$

где:

q – удельная теплота, Дж/кг;

Δu – изменение удельной внутренней тепловой энергии, Дж/кг. $\Delta u = c_v (T_z - T_0)$;

$l_{прот}$ – удельная работа потока против внешних сил, то есть работа проталкивания, состоящая из разности работ выталкивания и вталкивания, Дж/кг,

$$l_{прот} = l_{выталк} - l_{втальк} = p_z f_z s_z - p_0 f_0 s_0 = p_z v_z - p_0 v_0 = RT_z - RT_0 = R(T_z - T_0);$$

$l_{тех}$ – удельная техническая работа над внешним объектом, Дж/кг, $l_{тех} = 0$;

$\Delta e_{кин}$ – изменение удельной кинетической энергии, Дж/кг, $\Delta e_{кин} = 0$ для квазистатического процесса;

$\Delta e_{пот}$ – изменение удельной потенциальной энергии, Дж/кг. $\Delta e_{пот} = g\Delta z$.

С учётом найденных выражений и запишем уравнение (1)

$$q = c_v(T_z - T_0) + R(T_z - T_0) + g\Delta z \quad (2)$$

С учётом $q = 0$ и уравнения Майера $c_p = c_v + R$ получаем

$$c_p(T_z - T_0) = -g\Delta z \quad (3)$$

$$T_z - T_0 = \Delta T$$

Тогда искомое выражение для градиента температуры

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = - \frac{g}{c_p} \quad (4)$$

и

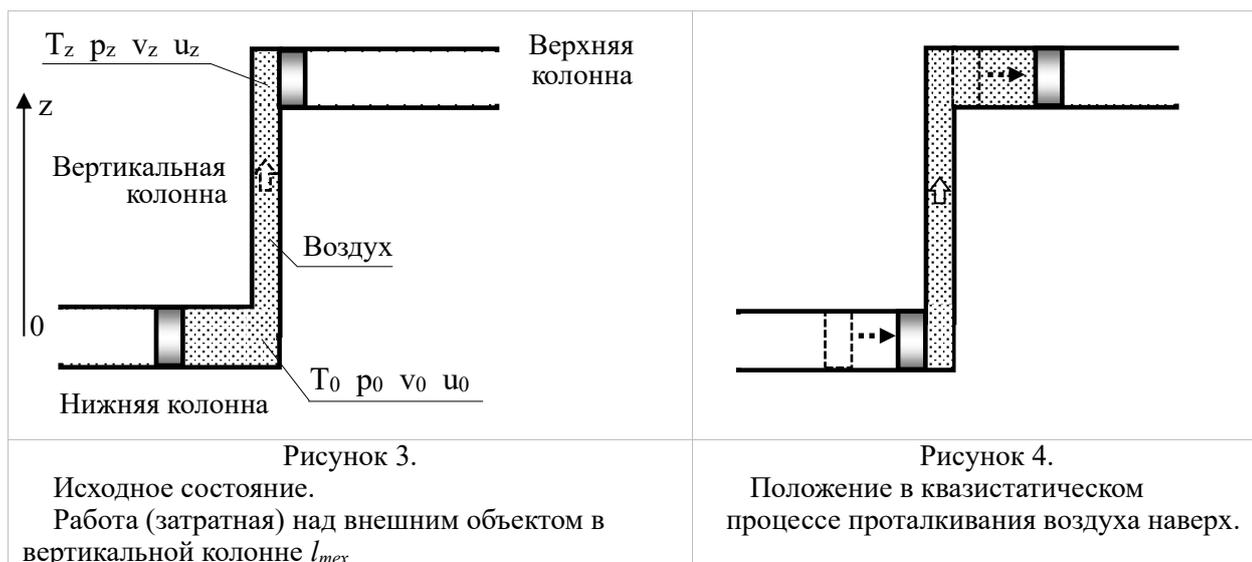
$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_p} \quad (5)$$

В предположении изотермичности воздуха в поле тяжести ($T_0 = T_z$ и $\Delta T = 0$) в уравнении (3) получаем

$$0 = -g\Delta z$$

что противоречит закону сохранения энергии, так как работа проталкивания не ведёт к увеличению потенциальной энергии и значит воздух не может быть изотермичным по высоте в поле тяжести.

2. Проталкивания воздуха наверх в термодинамике неподвижного тела (Рисунок 3 и Рисунок 4).



В термодинамике неподвижного тела надо сравнить состояние системы до начала проталкивания и после квазистатического проталкивания 1 кг воздуха. Далее следует оценить изменение внутренней тепловой энергии *всей* массы воздуха ΔU , произведённую (в нашем случае затратную) работу над внешними объектами действием поршней $L_{тех}$,

изменение потенциальной энергии для 1 кг воздуха и определить градиент температуры $\Delta T/\Delta z$.

В этом случае вместо работы проталкивания и условных пластин Π_z и Π_0 рассматриваем действие поршней как техническую работу (затратную), совершаемую воздухом над внешними объектами и забегая вперёд - с тем же получаемым градиентом температуры, что и в термодинамике потока.

Для схемы с неизотермической вертикальной колонной Первый закон термодинамики

$$Q = \Delta U + L_{\text{тех}} + \Delta E_{\text{пот}} \quad (6)$$

Составляющие уравнения:

$$Q = 0$$

$$\Delta U = (U_{\text{нижн}2} + U_{\text{верт}2} + U_{\text{верхн}2}) - (U_{\text{нижн}1} + U_{\text{верт}1} + U_{\text{верхн}1}) \quad (7)$$

где:

$U_{\text{нижн}1}$ - внутренняя тепловая энергия нижней колонны до проталкивания;

$U_{\text{верт}1}$ - внутренняя тепловая энергия вертикальной колонны до

проталкивания;

$U_{\text{верхн}1}$ - внутренняя тепловая энергия верхней колонны до проталкивания;

$U_{\text{нижн}2}$ - внутренняя тепловая энергия нижней колонны после проталкивания;

$U_{\text{верт}2}$ - внутренняя тепловая энергия вертикальной колонны после

проталкивания;

$U_{\text{верхн}2}$ - внутренняя тепловая энергия верхней колонны после проталкивания.

Для проталкивания 1 кг воздуха, когда в исходном состоянии в нижней колонне находится 1 кг, а в верхней горизонтальной колонне 0 килограммов и после проталкивания в нижней колонне находится ноль и в верхней 1 кг воздуха:

$$U_{\text{нижн}2} = 0$$

$$\text{Численно для 1 килограмма } U_{\text{верхн}2} = u_{\text{верхн}2}$$

$$\text{Численно для 1 килограмма } U_{\text{нижн}1} = u_{\text{нижн}1}$$

$$U_{\text{верхн}1} = 0$$

$$\text{отметим, что } U_{\text{верт}2} = U_{\text{верт}1}$$

Тогда уравнение (7) предстанет

$$\Delta U = (u_{\text{верхн}2}) - (u_{\text{нижн}1})$$

или

$$\Delta U = c_v (T_z - T_0)$$

$$\text{численно для 1 килограмма } L_{\text{тех}} = l_{\text{тех}} = R(T_z - T_0)$$

$$\text{численно для 1 килограмма } \Delta E_{\text{пот}} = \Delta e_{\text{пот}} = g\Delta z$$

Тогда уравнение $Q = \Delta U + L_{\text{тех}} + \Delta E_{\text{пот}}$ (6) предстанет

$$0 = c_v (T_z - T_0) + R(T_z - T_0) + g\Delta z$$

далее

$$c_p (T_z - T_0) = -g\Delta z$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = -\frac{g}{c_p}$$

и

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p}$$

3. Обобщение.

Полученный градиент температуры воздуха в поле тяжести $dT/dz = -g/c_p$ в термодинамике потока и в термодинамике неподвижного тела соответствует градиенту, выведенному в курсах физики Ландау Л.Д., Лифшица Е.М. [2] и Сивухина Л.В.[3].

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Мурзаков В.В. Основы технической термодинамики. М., «Энергия», 1973.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. ГИДРОДИНАМИКА. Теоретическая физика: т. VI, стр. 22
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Том I. Стр. 481, 482.