

## ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ДВУХСЛОЙНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБАХ

Конон П.Н., Докукова Н.А.

*УО «Белорусский государственный университет», Минск*

В энергетике в последние годы большее внимание уделяется экономичным режимам работы оборудования и их маневренным мощностям. Становится очевидной необходимость решения проблемы создания надежных дымовых труб в условиях частых пусков и остановок котельного оборудования, работы агрегатов в нестационарном тепловом режиме. Многократные циклы «нагрев-выдержка-охлаждение» оказывают наиболее существенное влияние на параметры напряженно-деформированного состояния конструкции. Вследствие этого требуется рассматривать нестационарные условия тепло- и массообмена, учитывающие перенос влаги в конструкциях футеровки и интенсивные фазовые превращения [1-4].

В работе рассмотрена наиболее используемая в эксплуатации двухслойная конструкция дымовой трубы, изображенная на рисунке 1. Она включает футеровку и примыкающий к ней вплотную железобетонный ствол. Температура и давление дымовых газов считаются известными функциями времени.

Проведенные предварительные количественные оценки тепло- и массообменных процессов в трубах в нестационарном режиме позволили заключить:

- ❖ перепад температур и концентрации пара в потоке дымовых газов по высоте трубы незначительный; градиент температур в стволе трубы по высоте на два – три порядка ниже, чем по толщине конструкции, и им можно пренебречь;
- ❖ при температуре дымовых газов ниже точки росы, когда давление водяных паров превышает давление насыщения на внутренней поверхности футеровки, происходит конденсация водяных паров. Образующийся конденсат частично проникает в поры футеровки, основная же часть стекает в виде сплошной пленки по вертикальной стенке. Оценка влияния пленки конденсата на теплообмен дает возможность ею пренебречь;
- ❖ поток влаги через внутреннюю поверхность футеровки обычно не превышает интенсивности конденсации на этой поверхности;
- ❖ потоки серной кислоты при конденсации через поверхность футеровки составляют незначительную величину по сравнению с потоками конденсирующихся водяных паров, и их влияние на температурно-влажностный режим не учитывается;
- ❖ предполагается, что процесс испарения в перегретой футеровке незначительно влияет на теплообмен;
- ❖ в силу того, что радиус трубы достаточно большой, процессы тепло- и массообмена рассматриваются в декартовой прямоугольной системе координат ОХУ (рис. 1).

При указанных допущениях модель тепло- и массообмена в двухслойной трубе можно представить следующей системой уравнений в частных производных с переменными коэффициентами:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T, U) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$\lambda(T, u) = \begin{cases} \lambda_1(T, U), & 0 \leq x \leq \delta_1 \\ \lambda_2(T), & \delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2 \end{cases}, \quad c\gamma = \begin{cases} c_1\gamma_1, & 0 \leq x \leq \delta_1 \\ c_2\gamma_2, & \delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2 \end{cases},$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \right], \quad 0 \leq x \leq \delta_1. \quad (2)$$

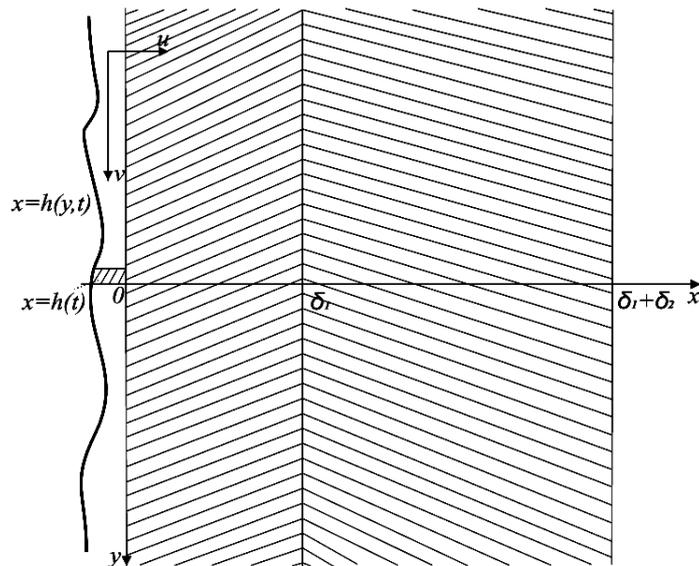


Рисунок 1 – Схема двухслойной дымовой трубы: несущий железобетонный ствол толщиной  $\delta_2$  и футеровка толщиной  $\delta_1$ , стекающая пленка конденсата  $x=h(x,t)$

На границе  $x = 0$  задаются граничные условия третьего рода с учетом конденсации на свободной поверхности:

$$-\lambda_1(T, U) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 [T_c(t) - T(0, t)] + g_k(t)r, \quad T_c = T_g + kt. \quad (3)$$

Интенсивность конденсации  $g_k(t)$  определяется формулой:

$$g_k(t) = g_k(T(0, t)) = \beta \{P_n(t) - P_n[T(0, t)]\}, \quad P_n(t) = P_0 + k_n t, \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент массообмена,  $P_0, P_n$  – начальное и текущее давление паровоздушной смеси,  $P_n(T)$  – давление насыщения, известная функция температуры. Если давление насыщения на стенке  $x = 0$  сравнивается с давлением паровоздушной смеси  $P_n$ , то конденсация заканчивается. Из этого условия можно определить время конденсации  $t_k$ .

На поверхности соприкосновения двух слоев ставится условие равенства температур и потоков тепла:

$$\left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=\delta_1} = 0, [T]_{x=\delta_1} = 0. \quad (5)$$

В (5) прямые скобки  $[ ]$  означают скачок потока тепла и температуры на границе  $x = \delta_1$ .

На границе  $x = \delta_1 + \delta_2$  задаются условия третьего рода:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1+\delta_2} = \alpha_2 [T(\delta_1 + \delta_2, t) - T_g]. \quad (6)$$

Граничные условия для определения влажностного поля определяются из следующих соображений. Считаем, что поле влаги распределяется в области футеровочного слоя толщиной  $\delta_1$ . Если поток влаги  $-a_m \partial U / \partial x$  не превосходит интенсивности конденсации  $g_k(t)$ , то на границе  $x = 0$  задается значение влагосодержания  $U_{ms}$ , соответствующее полному насыщению. Если же поток влаги больше интенсивности конденсации, то на границе ставится условие равенства потока влаги и интенсивности конденсации.

$$\begin{cases} U(0,t) = U_{nn}, & \text{при } -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} \leq g_\kappa(t) \\ -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = g_\kappa(t), & \text{при } -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} > g_\kappa(t) \end{cases} \quad (7)$$

При  $x = \delta_1$  значения влагосодержания равно равновесному

$$U \Big|_{x=\delta_1} = U_p. \quad (8)$$

Кроме того, задаются начальные условия

$$T(x,0) = T_e, \quad U(x,0) = U_0. \quad (9)$$

Кроме указанных ранее в соотношениях (1)–(9) использованы следующие обозначения и размерности величин:  $\delta_1, \delta_2$  – толщины футеровки и железобетонного ствола соответственно, м;  $\lambda(T, U)$  – коэффициент теплопроводности, вообще говоря, функция температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и влагосодержания  $U$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $c$  – теплоемкость материала,  $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\gamma$  – объемная масса,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, от газа к внутренней поверхности трубы и от наружной поверхности трубы к воздуху,  $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $r$  – теплота фазового перехода,  $\text{ккал}/\text{кг}$ ;  $a_m(U)$  – коэффициент диффузии влаги, известная функция влагосодержания,  $\text{м}^2/\text{ч}$ ;  $T_e, T_a$  – температура, соответственно, дымовых газов в трубе и наружного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $g_\kappa(t)$  – массовая скорость конденсации,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм.рт.ст.})$ ;  $P_n$  – парциальное давление пара,  $\text{мм.рт.ст.}$ ;  $P_n [T(0,t)]$  – давление насыщения, известная функция температуры,  $\text{мм.рт.ст.}$ ;  $k$  – скорость подъема температур дымовых газов,  $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ ;  $k, k_n$  – скорость подъема температуры и парциального давления дымовых газов,  $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ ,  $\text{мм.рт.ст.}/\text{ч}$   $U_p = U_0$  – равновесное значение влагосодержания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Соотношения (1)–(9) определяют постановку задачи о совместном тепло- и массопереносе в конструкции двухслойной трубы.

Приведем результаты расчетов температурных, влажностных полей и интенсивности конденсации. Расчеты выполнены численным методом с использованием консервативных неявных разностных схем методом прогонки [5]. Результаты приведены в единицах измерения, удобных для практического использования.

Для расчета полей влаги в футеровке и температур в двухслойной трубе использовались приведенные ниже геометрические размеры и теплофизические характеристики материалов.

Несущий ствол – железобетон марки М300 с  $\gamma_2 = 2200 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\lambda_2 = 1,33 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $c_2 = 0,2 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $\alpha_2 = 20 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $\delta_2 = 0,30 \text{ м}$ . Футеровочный слой трубы – полимер-силикатный бетон с  $\gamma_1 = 1700 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\lambda_1 = 0,33 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $c_1 = 0,2 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $\alpha_1 = 24,1 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ,  $\delta_1 = 0,15 \text{ м}$ . Характеристики массообмена следующие:  $r = 540 \text{ ккал}/\text{кг}$ ;  $u_{n.n.} = 200 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $u_p = 25 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\beta = 0,71 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм.рт.ст.})$ .

Для определения давления насыщения использовалась эмпирическая зависимость [2]:

$$P_n(T) = \begin{cases} 165914 \times e^{\frac{7.331 \times (T-374)}{T+273}}, & T > 100^{\circ}\text{C} \\ 760 \times e^{\frac{13.963 \times (T-100)}{T+273}}, & T < 100^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

Для расчета поля влагосодержания применялась функция  $a_m(U)$ , заданная дискретными значениями. При проведении численных расчетов она аппроксимировалась линейной интерполяцией.

Режим работы трубы (нагрев-выдержка-охлаждение) задается следующим образом: подъем температуры дымовых газов  $T_z$  от  $T_g = -20^\circ\text{C}$  до  $T_m = 160^\circ\text{C}$  по линейному закону со скоростью  $k = 10^\circ\text{C}/\text{ч}$ , выдержка до стационарного режима при  $T_z = T_m$ , охлаждение от  $T_z = T_m$  до  $T_g = -20^\circ\text{C}$  линейно со скоростью  $k = 10^\circ\text{C}/\text{ч}$ , дальнейшее охлаждение трубы при  $T_z = T_g$ .

На рисунках 2-4 приведены результаты численных расчетов температурных полей двухслойной дымовой трубы при указанном выше режиме работы в одном из сечений. Наибольший градиент температуры наблюдается в футеровочном слое.

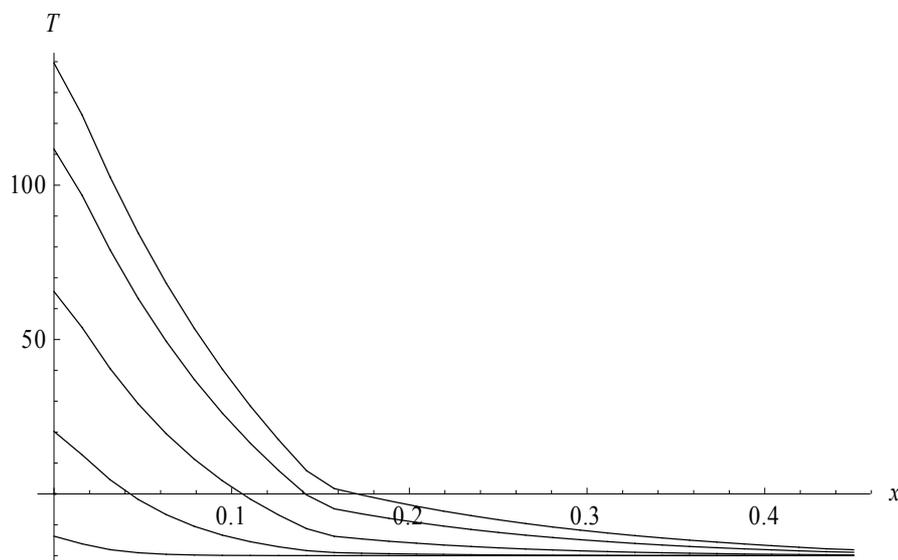


Рисунок 2 – Температурное поле двухслойной трубы в моменты времени  $t=1\text{ч}$ ,  $t=5\text{ч}$ ,  $t=10\text{ч}$ ,  $t=15\text{ч}$ ,  $t=18\text{ч}$  в период подъема температуры дымовых газов

При расчете поля влагосодержания использовалась зависимость  $a_m(U)$ , заданная дискретными значениями. В численных расчетах она аппроксимировалась линейной интерполяцией.

Расчет поля влаги в различные значения времени в футеровочном слое отображен на рис. 5.

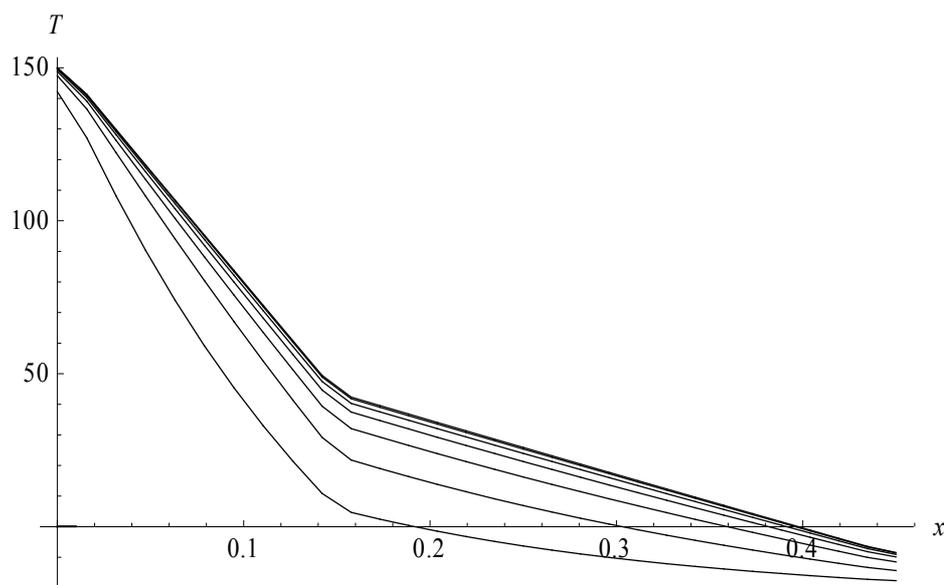


Рисунок 3 – Температурное поле двухслойной трубы в моменты времени  $t=1\text{ч}$ ,  $t=10\text{ч}$ ,  $t=20\text{ч}$ ,  $t=30\text{ч}$ ,  $t=40\text{ч}$ ,  $t=55\text{ч}$  в период неизменной температуры дымовых газов

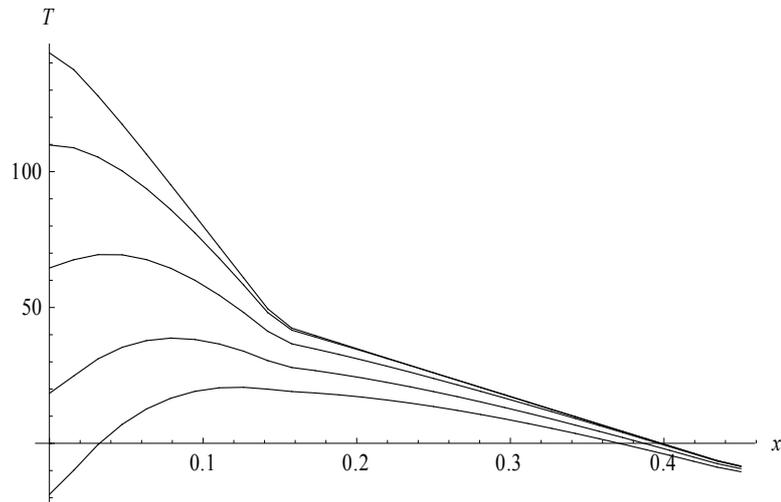


Рисунок 4 – Температурное поле двухслойной трубы в моменты времени  $t=1ч$ ,  $t=5ч$ ,  $t=10ч$ ,  $t=15ч$ ,  $t=19ч$  с начала охлаждения температуры дымовых газов

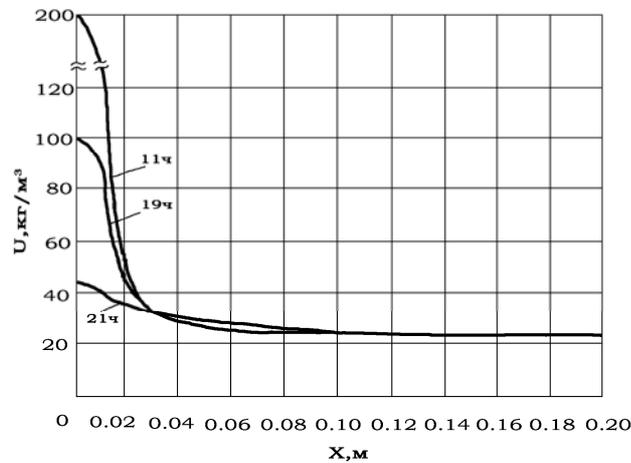


Рисунок 5 – Поле влаги в футеровочном слое в моменты времени  $t=11ч$ ,  $t=19ч$ ,  $t=21ч$

В расчетах интенсивности нестационарной конденсации применяется соотношение (4). На рисунке 6 изображена интенсивность конденсации  $g_k(t)$  при различных скоростях подъема температур дымовых газов  $k = v = 30^\circ C/ч$ ,  $k = v = 10^\circ C/ч$ , а также зависимость потока влаги  $-a_m \partial U / \partial x$  через стенку  $x=0$  от времени.

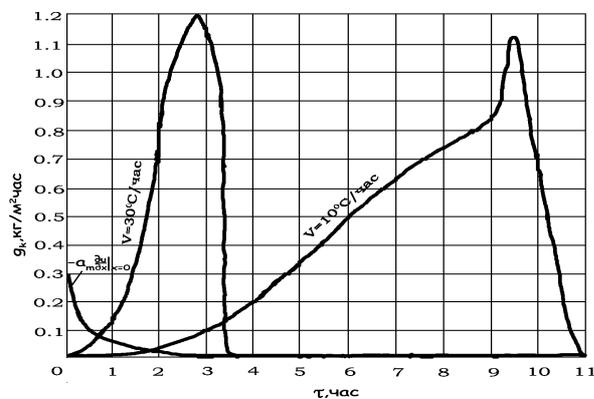


Рисунок 6 – Зависимость интенсивность конденсации  $g_k$  на внутренней поверхности футеровки и потока

влаги через нее от времени  $g_{ном} = -a_m \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0}$

Оценка толщины пленки конденсата  $h=h(t)$  с плотностью  $\rho'$  в определенный момент времени в заданном сечении трубы вычисляется при условии, что пленка образуется вследствие конденсации и часть жидкости проникает в футеровочный слой. Тогда

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\beta \{P_n(t) - P_n[T(0,t)]\}}{\rho'} + \frac{1}{\rho'} \left( a_m \frac{\partial u}{\partial x}(0,t) \right). \quad (11)$$

Расчеты интенсивности конденсации показывают, что практически во все время подъема температуры дымовых газов вторым слагаемым можно пренебречь. Тогда максимальную толщину пленки конденсата на неподвижной поверхности можно определить из выражения

$$h_{\max} = \int_0^{t_k} \frac{g_k}{\rho'}(t) dt, \quad (12)$$

где  $t_k$  – время конденсации.

Вычисления показывают, что толщина пленки конденсата при скорости подъема температуры газов  $k = 30^\circ \text{C}/\text{ч}$  не превышает  $h_{\max} = 2 \text{ мм}$ , а при более длительной конденсации при  $k = 10^\circ \text{C}/\text{ч}$  она равна  $h_{\max} = 4 \text{ мм}$ , что согласуется с результатами Кутателадзе [6]. Зная величину интенсивности конденсации и площадь поверхности конденсации – внутреннюю поверхность трубы, можно определить общее количество выпавшего конденсата.

### Резюме

Исследована задача нестационарного тепло- и массопереноса в двухслойной дымовой трубе. Численным расчетом найдено поле температур и влаги при маневренной работе трубы. Определена интенсивность конденсации на внутренней поверхности футеровки, проведен расчет пленки конденсата.

### Литература

1. Петров-Денисов В.Г., Конон П.Н. // Процессы тепло- и массообмена в стволах дымовых труб в нестационарном режиме/ Всесоюзная конф. «Современные проблемы разработки, проектирования, возведения и эксплуатации монолитных железобетонных труб», М., 1983, с.66-68.
2. Матвеев Ю.В., Конон П.Н. Комплекс программ для расчета температурно-влажностных полей и напряженно-деформированного состояния дымовых труб с монолитной футеровкой при осесимметричных температурных и силовых воздействиях. – М.: Сб. трудов ВНИПИ Теплопроект, 1985.
3. Конон П. Н., Поддубная М. А.// Нестационарные процессы тепло- и массопереноса в конструкциях двухслойных дымовых труб/ АМАДЕ-2011,-Минск, 2011.
4. Конон П. Н., Докукова Н.А., Поддубная М.А.// Исследования нестационарных процессов тепло- и массообмена в многослойных дымовых трубах/ Международная научная конференция «XI Белорусская математическая конференция», Минск, 4-9 ноября 2012, Ч. 3, С. 70.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики.- М.: Наука, 1977.-740 с.
6. Кутателадзе С.С. Основные теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. 659 с.

### Summary

*It was investigated the problem of unsteady heat and mass transfer in a two-layer stack. With help numerical calculations we obtain the measure of temperature and moisture of work of maneuvering. We found intensity of condensation on the inner surface of the lining, and calculated condensate film.*

Поступила в редакцию 17.11.2012