

УДК: 533.6.011.72

## Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров

С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов<sup>а</sup>

Томский государственный университет,  
физико-технический факультет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

E-mail: <sup>а</sup> akrainov@ftf.tsu.ru

Получено 5 октября 2011 г.

Представлена математическая модель для расчета охлаждения емкостей для десублимации паров охлажденным воздухом, подаваемым к ним по сети трубопроводов. Приведены результаты расчетов процесса охлаждения двух приемных емкостей в блоке из четырех. Представлена картина течения охлаждающего воздуха в сети трубопроводов.

Ключевые слова: сеть трубопроводов, приемные емкости, охлаждение, математическое моделирование

## Numerical simulation of cooling tanks for vapor desublimation processes

S. M. Gubanov, A. Yu. Kraynov<sup>а</sup>

Tomsk State University, Physical-Technical Faculty, TSU, 36 Lenin St., Tomsk, 634050, Russia

**Abstract.** – The paper presents a mathematical model to be used for design of cooling tanks for vapor desublimation. Results of calculations for the process of cooling of two tanks in a block of four are presented. Chart of the cooling air flow in the piping network is presented.

Keywords: a network of pipelines, containers, cooling, mathematical modeling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 383–388 (Russian).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-08-00370-а.

В химической технологии для получения очищенного конечного продукта используется процесс десублимации. Одна из схем получения конечного продукта состоит из циклического проведения десублимации и сублимации с применением нескольких приемных емкостей (ПЕ). Система очистки представляет собой разветвленную систему коммуникаций для транспортировки холодного воздуха одновременно к нескольким ПЕ. Емкости поочередно работают на прием и выдачу продукта. В фазе приема продукта ПЕ термостатируется с использованием потока холодного воздуха или азота в теплообменных трубах. После заполнения ПЕ продуктом поток холодного воздуха в теплообменник отключается и в фазе выдачи продукта происходит индуктивный нагрев материала емкости, сублимация продукта и перетекание его в товарные емкости. После окончания фазы выдачи продукта из ПЕ он охлаждается до температуры десублимации продукта и цикл повторяется.

Для проведения анализа процесса охлаждения ПЕ от момента окончания режима сублимации до начала процесса десублимации проведено математическое и численное моделирование процесса охлаждения емкостей. Математическая модель течения холодного воздуха в трубопроводной системе основана на модели [Математическое моделирование ..., 2006; Васенин, Шрагер, Крайнов и др., 2011] и записана при следующих допущениях.

– Сеть трубопроводов представляется системой прямолинейных участков с разветвлениями, поворотами, сопряжениями труб различного диаметра, в конце трубопроводной сети имеется связь с атмосферой.

– Движение газа в прямолинейных участках системы трубопроводов моделируется нестационарными одномерными уравнениями газовой динамики.

– Параметры газа в объемах сопряжений трубопроводов определяются из законов сохранения массы и энергии.

– Теплообмен между газом и стенками труб описывается законом Ньютона и учитывается в уравнении энергии газа правыми частями.

– Изменение температуры стенок труб определяется из решения уравнения переноса тепла в стенке.

Записанная с учетом сделанных предположений система уравнений имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2 + p}{\partial x} = -\Pi \tau_w / s, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u E + p u}{\partial x} = -\Pi \alpha (T - T_w) / s, \quad (3)$$

$$p = \rho R T, \quad (4)$$

$$E = e + u^2 / 2, \quad e = \frac{p}{\rho(k-1)},$$

где уравнения неразрывности (1), движения (2), энергии (3) и состояния идеального газа (4) записываются для всех прямолинейных участков трубопроводной сети. В этих уравнениях  $x$  – координата;  $t$  – время;  $\rho$  – плотность газа;  $u$  – скорость;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $T_w$  – температура стенок;  $s(x)$  – сечение,  $\Pi$  – периметр трубопроводов;  $k$  – показатель адиабаты газовой смеси,  $R$  – газовая постоянная;  $\tau_w$  – напряжение трения на стенках трубопроводов;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи и напряжение трения вычисляются по эмпирическим формулам [Справочник по теплообменникам, 1987]:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{D}, \quad \text{Nu} = 0.022 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.47}, \quad \tau_w = \frac{c_f}{8} \rho u |u|,$$

$$c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}, \quad \text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu},$$

где  $\text{Nu}$  – число Нуссельта;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\text{Pr}$  – число Прандтля;  $D$  – диаметр трубопровода;  $\lambda$ ,  $\mu$  – коэффициенты теплопроводности и вязкости газа;  $c_f$  – коэффициент сопротивления.

Повороты, разветвления и сопряжения трубопроводов будем представлять объемом заданной величины. Предполагая давление одинаковым по объему, смешение потоков из примыкающих трубопроводов с разными температурами происходит мгновенно, отсутствие трения, запишем законы сохранения массы и энергии для объема сопряжения в виде

$$V \frac{d\rho}{dt} = \sum_k G_k, \quad (5)$$

$$V \frac{dE}{dt} = \sum_k G_k H_k, \quad (6)$$

$$p = \rho R T. \quad (7)$$

В этих уравнениях:  $\rho$  – плотность газа в объеме  $V$ ;  $E = C_v \rho T$  – его внутренняя энергия;  $T$  – температура;  $G_k$  – потоки массы между объемом  $V$  и примыкающим  $k$ -м трубопроводом;  $H_k = C_p T_k$  – энтальпия газа в потоке  $G_k$ ; суммы по  $k$  берутся по всем трубопроводам, примыкающим к объему  $V$ .

В нестационарных условиях газодинамики и теплообмена температура стенок трубопроводов меняется во времени и влияет на динамику движения холодного воздуха в трубопроводной сети. Так как наибольший градиент температуры формируется в направлении, перпендикулярном стенкам трубопровода, будем моделировать распространение тепла в стенках трубопровода на основе одномерного уравнения теплопроводности в направлении перпендикулярном стенке во всех точках вдоль трубопроводов:

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_m}{\partial r} \right), \quad (8)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T_m(x, r, 0) = T_{m,0}, \quad \frac{\partial T_m(x, R_{ou}, t)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_m(x, R_{in}, t)}{\partial r} = \alpha (T(x, t) - T_m(x, R_{in}, t)), \quad (9)$$

где  $r$  – координата вглубь стенок трубопровода;  $\chi$  – коэффициент температуропроводности материала трубопровода;  $\chi = \lambda_m / (c_m \rho_m)$ ;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности;  $c_m$  – удельная теплоемкость;  $\rho_m$  – плотность материала трубы;  $R_{in}$ ,  $R_{ou}$  – внутренний и внешний радиусы трубопровода,  $T_m$  – температура в стенке трубопровода;  $T(x, t)$  – температура газа, определяется из решения системы уравнений (1)–(7);  $T_m(x, R_{in}, t)$  – температура поверхности внутренних стенок трубопровода, определяется из решения уравнения (8) с краевыми условиями (9). Полученные значения  $T(x, R_{in}, t) = T_w$  используются в модели (1)–(7). Поэтому уравнения (1)–(7) и (8)–(9) решаются совместно.

В качестве начальных условий для системы уравнений (1)–(7) задаются начальные распределения давления, температуры и скорости

$$p(x, 0) = p_n, \quad T(x, 0) = T_n, \quad u(x, 0) = 0 \quad (10)$$

и параметры состояния газа в объемах сопряжений

$$p_j(0) = p_n, T_j(0) = T_n, \quad (11)$$

индекс  $n$  – начальные условия.

В качестве граничных условий на входе в трубопроводную систему в месте подачи холодного воздуха задаются значения массового расхода воздуха и его энтальпии, на выходе трубопровода в атмосферу задается значение давления.

Для численного решения системы уравнений (1)–(4) использовался метод С. К. Годунова [Годунов, Забродин, Иванов и др., 1976]. Обыкновенные дифференциальные уравнения (5), (6) решались методом Эйлера. Уравнения теплопроводности (8) с краевыми условиями (9) решались по неявной разностной схеме методом прогонки.

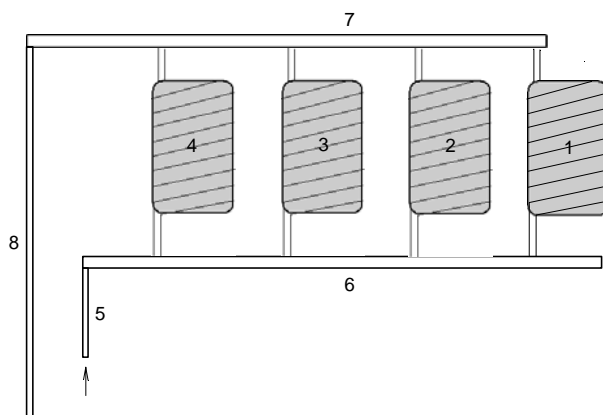


Рис. 1. Участок системы охлаждения. 1–4 – ПЕ, 5–8 – трубопроводы

Для расчета теплообмена в трубопроводной сети между потоком холодного воздуха и ПЕ была выбрана система из четырех ПЕ, две из которых находятся в изотермических условиях и две – в режиме охлаждения. Трубопроводная сеть представлена на рисунке 1.

Задано, что поток холодного воздуха с температурой 213 К подается в трубопровод из латуни 5 диаметром 51 мм в 6 диаметром 100 мм и распределяется по стальным каналам в ПЕ. После теплообмена в ПЕ воздух по латунному трубопроводу диаметром 100 мм переходит в латунный трубопровод 7 диаметром 51 мм и выбрасывается в атмосферу. Расход холодного воздуха – 500 кг/ч, его температура – 213 К. ПЕ изготовлены из стали, их масса 90 кг. Длина пути воздуха по каналам ПЕ – 16 м. Предполагается, что ПЕ 1 и 2 перед началом режима охлаждения имеют температуру 343 К, ПЕ 3 и 4 имеют температуру 213 К и термостатированы потоком воздуха с такой же температурой.

Результаты расчетов представлены на рисунке 2 в виде распределения давления, скорости, температуры газа и внутренней поверхности стенок трубопровода по пути движения газа I – 5-6-1-7-8, II – 5-6-2-7-8 (на рисунке 1) в последовательные моменты времени с интервалом 10 минут.

Из представленных на рисунке 2 результатов видно, что в процессе остывания емкостей меняется скорость движения газа в системе трубопроводов и распределение температуры газа и стенок трубопровода (на рисунке 2а-ф). Распределение давления по пути движения охлаждающего воздуха со временем изменяется не значительно (рис. 2а, б). Скорости движения газа на начальном этапе заметно меняются (рис. 2с, д). Температура газа и внутренней поверхности трубопровода ПЕ 1 и 2 меняется во времени (рис. 2е, ф). Из расчетов установлено, что при заданном потоке холодного воздуха две стальные емкости ПЕ массой 90 кг остывают до температуры  $\sim -60$  °С за 1 час.

Таким образом, разработана математическая модель и численная методика, позволяющие проводить численное моделирование охлаждения приемных емкостей потоком холодного воздуха, подаваемого по трубопроводной системе.

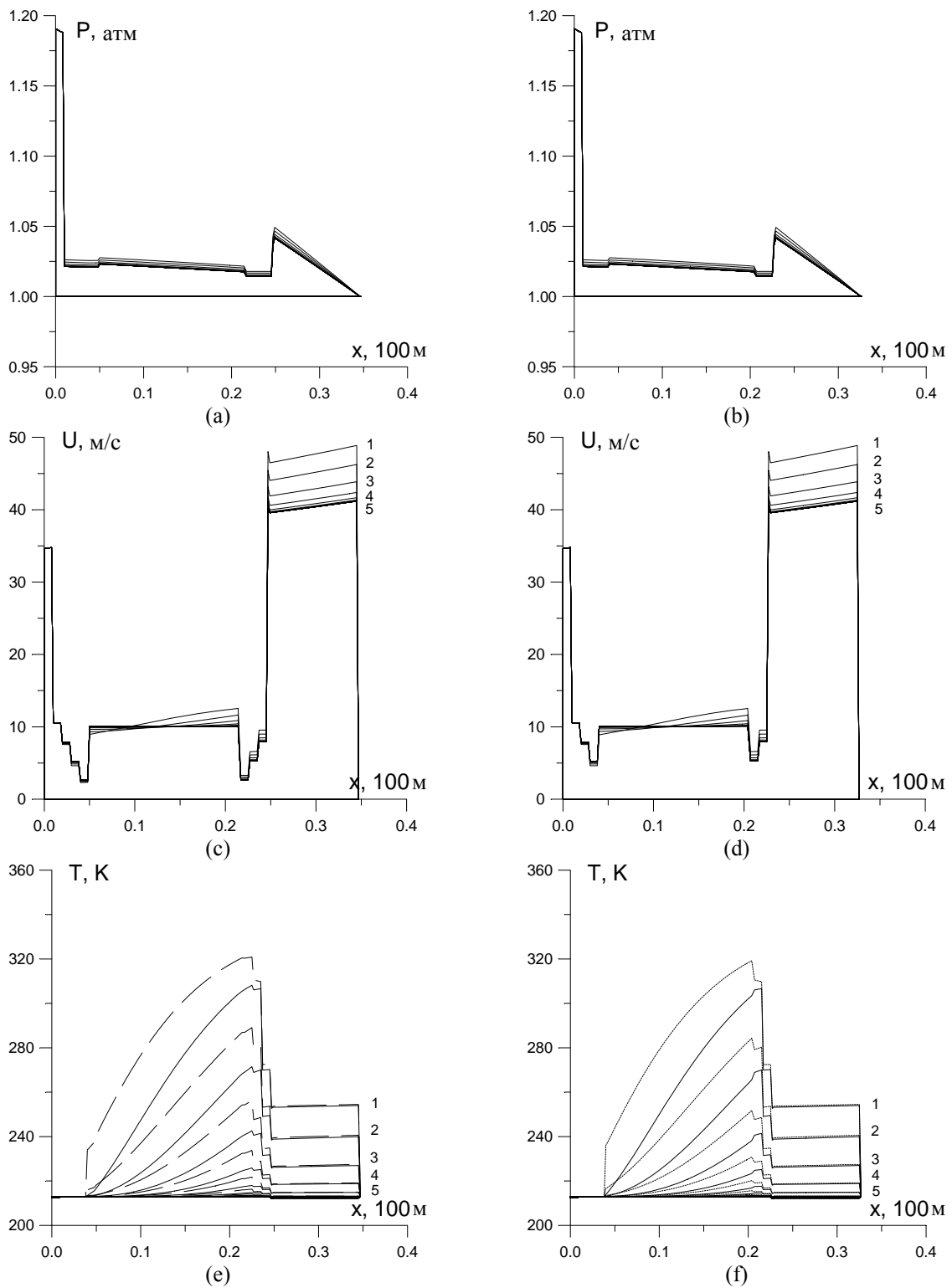


Рис. 3. Распределение давления, скорости, температуры газа (сплошная линия) и температуры внутренней поверхности трубопровода (штриховая линия) по пути движения газа I (a, c, e) и II (b, d, f). Кривые построены в последовательные моменты времени с интервалом 10 минут с момента начала охлаждения ПЕ

**Список литературы**

*Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Костеренко В. Н.* Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 155–163.

*Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / Под ред. И. М. Васенина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 322 с.

Справочник по теплообменникам. В двух томах. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 561 с.