

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАНОВЛЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В СОПЛЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА

©2016 А.Л. Тукмаков, А.А. Ахунов, П.А. Чибирев

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева  
- КАИ

### MODELING OF A TWO-PHASE FLOW IN THE STEAM GENERATOR NOZZLE

Tukmakov A.L., Ahunov A.A., Chibirev P.A. (Kazan National Research Technical University  
named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russian Federation)

*A modeling of a two-phase flow in the steam generator nozzle based on the numerical solution of a boiling liquid dynamics equations system.*

В технологиях газификации криогенных жидкостей, также, как и в технологиях очистки и опреснения воды, основанных на адиабатическом расширении жидкости в каналах переменного сечения, в качестве парогенератора используется сопло Лавала [1]. Капельная жидкость, проходя через сопло, испытывает фазовые превращения. Режим работы сопла, зависящий от температуры жидкости на входе, от формы сопла, и от рабочего перепада давления, выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемые выходные параметры. В случае технологических процессов очистки и опреснения воды это массовое содержание пара в выходном сечении сопла. Применительно к технологиям газификации криогенных жидкостей важна также достигаемая в процессе расширения температура парокапельной среды: понижение температуры ниже температуры тройной точки позволяет получить дисперсную фазу в шугообразном состоянии, которая применяется для последующего охлаждения криогенной жидкости в ёмкости-хранилище. Моделирование работы сопла предполагает описание течения капельной жидкости, её вскипание в окрестности минимального сечения и движение паро-капельного потока в диффузоре. Сложный процесс установления двухфазного течения, при котором вскипающая пузырьковая жидкость переходит в паро-капельный поток, определяется способом запуска сопла. В данной работе делается попытка описать начальный этап формирования течения, когда в начальный момент времени при  $t=0$  сопло заполнено однофазной жидкостью, давление которой равно давлению во входном сечении. Задаётся дав-

ление на выходе сопла и при  $t>0$  начинается процесс установления двухфазного течения в расширяющейся части канала. Для описания течения двухфазной среды на эйлеровом этапе применялась система уравнений движения вскипающей жидкости [2, 3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} = -j - \rho_0 \frac{\partial \alpha}{\partial t},$$

$$\frac{\partial(u\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2\rho + p - \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(uv\rho - \tau_{xy})}{\partial y} = \alpha \frac{\partial p}{\partial x} - u \cdot j,$$

$$\frac{\partial(v\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(uv\rho - \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(v^2\rho + p - \tau_{yy})}{\partial y} = \alpha \frac{\partial p}{\partial y} - v \cdot j,$$

$$\frac{\partial(e)}{\partial t} + \partial\left((e + p - \tau_{xx})u - \tau_{xy}v + \lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) / \partial x +$$

$$\partial\left((e + p - \tau_{yy})v - \tau_{xy}u + \lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) / \partial y =$$

$$-U_{LV} - H \cdot W_{CL} + \alpha(\partial(pu) / \partial x + \partial(pv) / \partial y),$$

$$\partial N_b / \partial t + \partial(uN_b) / \partial x + \partial(vN_b) / \partial y = H,$$

$$e = \rho(C_v T + 0.5(u^2 + v^2)),$$

$$H = \rho_l \left( \frac{2\sigma N_a^3}{\pi m^3} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{W_{cl}}{k_b T_l}\right),$$

$$W_{CL} = 16\pi\sigma^3 / 3(p^{sat}(T) - p)^2,$$

$$U_{LV} = 4\pi R^2 N_b \frac{\eta_{ac}}{\gamma_v - 1} \sqrt{R_v / 2\pi} \left( p^{sat}(T) \sqrt{T} - p_v \sqrt{T_v} \right),$$

$$p = \rho RT + (B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2}) \rho^2 - (bRT - a) \rho^3 +$$

$$a\alpha \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2),$$

$$j = 4\pi\pi^2 \eta_{ac} \left( p(T) / \sqrt{T} - p_v / \sqrt{T_v} \right) / \sqrt{2\pi\pi_v},$$

$$\alpha = \frac{4}{3} \pi R^3 N_b.$$

Система записывалась в обобщённых криволинейных координатах с уравнением

состояния Бенедикта-Вебба-Рубина [4] и решалась неявным конечно-разностным методом Стегера- Уорминга с факторизацией пространственного оператора [5] и схемой нелинейной коррекции. Лагранжев этап включал решение уравнения Рэлея-Ламба для радиуса паровых пузырьков, давление пара внутри которых предполагалось равным давлению насыщения при текущей температуре жидкости.

Были выполнены расчёты, описывающие процесс установления полей скорости, плотности и давления для заполняющего сопло жидкого метана с заданной начальной температурой.

Ниже на рис. 1-3 приведены результаты расчётов установления двухфазного течения через сопло при начальной температуре жидкого метана  $T=170\text{K}$ .

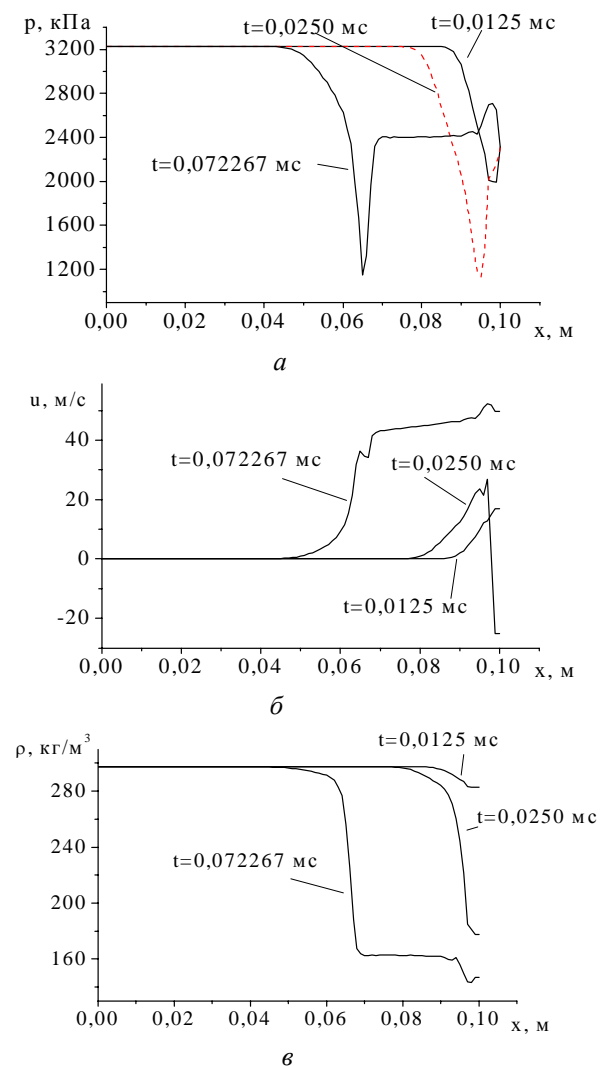


Рис.1. Положение волн разрежения давления (а), скорости (б) и плотности (в), распространяющихся вверх по потоку в различные моменты времени

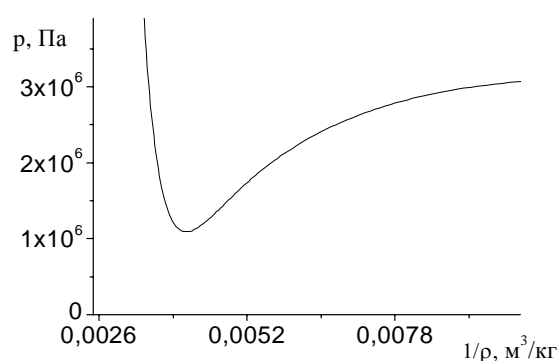


Рис.2. Фрагмент изотермы метана при температуре  $T=170\text{K}$

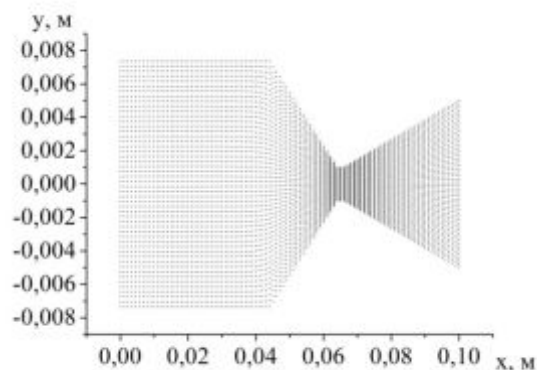


Рис.3. Конечно-разностная сетка в физической области

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ. Соглашение о субсидии №14.577.21.0151 от 28.11.2014 г. Идентификатор проекта RFMEFI57714X0151.

#### Библиографический список

1. Тонконог В.Г., Арсланова С.Н. Система подачи криогенного топлива в энергетическую установку. Патент РФ на изобретение Ru, № 2347934. Дата выдачи 10.06.2009.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Изд-во «Наука», 1987. Ч.1.464 с.
3. Кумзерова Е.Ю., Шмидт А.А. Численное моделирование нуклеации и динамики пузырьков при быстром падении давления жидкости// Журнал технической физики. 2002. Т.72. Вып.7. С.36-40.
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: «Химия». Ленинградское отделение, 1982. 496 с.
5. Fletcher С.А., Computation Techniques for Fluid Dynamics. Springer-Verlang: Berlin et al., 1988. 502 p.