

УДК 517.4:533.7

О ВЛИЯНИИ ТЕПЛООБМЕНА С ЗЕМЛЕЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ХОЛОДНОГО ТЯЖЕЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

И. В. КОВАЛЕЦ

Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев

Получено 14.03.2001

В работе численно решена сопряженная задача теплообмена облака холодного газа и поверхностного слоя Земли. Показано, что теплообмен с Землей оказывает существенное влияние на динамику облака холодного газа.

В роботі чисельно розв'язана спряжена задача теплообміну хмари важкого холодного газу та поверхневого шару Землі. Показано, що теплообмін із Землею суттєво впливає на динаміку хмари важкого газу.

The coupled problem of heat transfer for cloud of dense cold gas and the surface layer of the ground. It was shown that heat transfer with ground essentially effects on the dense gas dynamics.

В результате аварий на предприятиях химической промышленности выброшенные в атмосферу газообразные вещества, как правило, имеют плотность выше, чем у окружающей среды. Это зачастую связано с тем, что выбрасываемые газообразные вещества имеют низкую температуру по сравнению с окружающим воздухом. Как было показано в [3], для моделирования таких выбросов нельзя экстраполировать результаты лабораторных изотермических экспериментов из-за неадиабатичности, связанной с притоком тепла от поверхности земли.

В настоящей работе рассмотрена сопряженная задача теплообмена облака тяжелого холодного газа с Землей. Для этой цели используется трехмерная модель распространения тяжелого газа в атмосфере DETATOX (DENSE-THAN-AIR-TOXICANT TRANSPORT MODEL) [1-2], в которой численно решается система уравнений движения, внутренней энергии, неразрывности и концентрации газа совместно с уравнениями $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

Распространение тепла в Земле моделировалось с помощью одномерного уравнения теплопроводности

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\rho_s c_s \chi \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = -q, \quad T|_{z=-H} = T_\infty. \quad (2)$$

Здесь T_s, ρ_s, c_s, χ – температура, плотность, удельная теплоемкость и коэффициент температуропро-

водности почвы; q – поток тепла через границу атмосфера – поверхность Земли. Предполагается, что H много больше глубины проникновения возмущений в толщу Земли H_0 , которую можно определить из соображений размерности (см. [3]): $H_0 = \chi \Delta T_0 / q_0$, где ΔT_0 – начальная разность температуры между газом и Землей; q_0 – значение потока тепла в начальный момент времени.

Учет притока тепла от подстилающей поверхности в модели DETATOX осуществлялся с помощью соотношений для смешанной конвекции [4]:

$$q = (\lambda_1 + \lambda_2)(T_g - T_s) \quad (3)$$

где T_g, T_s – температуры газа и поверхности Земли соответственно; λ_1 и λ_2 определяются по формулам

$$\lambda_1 = \rho_g c_{pg} c_h |u|, \quad (4)$$

$$\lambda_2 = C ((T_g - T_s) (\beta \nu / Pr))^{1/3}. \quad (5)$$

Здесь $\rho_g, c_{pg}, u, \nu, Pr$ – плотность, удельная теплоемкость, модуль горизонтальной скорости, теплопроводность и число Прандтля газа. Параметр плавучести $\beta = (g/T_g)$, значения постоянных C и c_h равны 0.14 и 0.0036 соответственно.

Сопряженная задача решалась численно. Метод решения гидродинамической задачи изложен в [2]. Задача (1) – (3) решалась методом конечных разностей по неявной схеме. На рис. 1 приведено сравнение численного решения задачи (1) – (3) с аналитическим решением [3], полученным для постоянной $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, постоянной температуры T_g и постоянной начальной T_s . Решение для потока

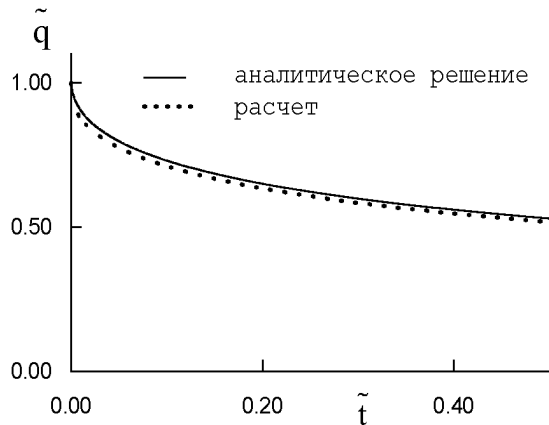


Рис. 1. Сравнение аналитического и численного решений задачи (1) – (3)

тепла через поверхность Земли имеет вид

$$\tilde{q}(\tilde{t}) = \exp(\tilde{t}) \operatorname{erfc}(\tilde{t}^{1/2}). \quad (6)$$

Здесь безразмерный поток $\tilde{q} = q/q_0$. Безразмерное время $\tilde{t} = tq_0^2/(\rho_s c_{ps} \chi \Delta T_0)$. Отметим хорошее совпадение результатов расчетов с аналитическим решением.

Изучение влияния теплообмена с Землей на динамику тяжелого газа проводилось на примере растекания облака холодного природного газа в натурном эксперименте BURRO 8 [5]. Газ поступал из источника, находящегося на уровне поверхности Земли с приблизительно постоянной скоростью и температурой, равной 110 °K. Область расчетов была ориентирована по ветру, скорость которого на высоте 2 м составляла 1.8 м/с. На рис. 2 представлены продольные профили температуры, рассчитанной моделью DETATOX для двух случаев: без учета и с учетом притока тепла от поверхности земли. Как видно из рисунков, влияние потока тепла на динамику облака газа существенно: с одной стороны, нагревание газа приводит к поднятию центра масс облака, что соответствует более высокому положению изолиний в случае с теплообменом. С другой стороны, это нагревание уменьшает роль гравитационных эффектов.

Таким образом, проведенные численные расчеты показали, что теплообмен с подстилающей поверхностью оказывает заметное влияние на динамику холодного тяжелого газа в атмосфере. Одновременно, роль уменьшения потока тепла за счет охлаждения поверхности Земли может быть различной, в зависимости от длительности процесса. Например, в случае эксперимента BURRO 8,

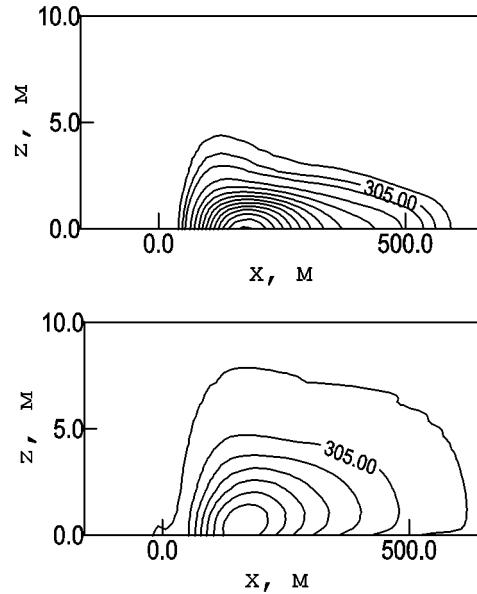


Рис. 2. Вертикальные профили температуры для $t=300$ с, с учетом теплообмена (а) и без теплообмена (б) с поверхностью Земли. Изолинии проведены с интервалом 2°K

$t \approx 1000$ с, $\tilde{t} \approx 0.015$, что, согласно (6), соответствует $\tilde{q}_{\min} \approx 0.85$, т.е. максимальное отличие потока тепла с учетом охлаждения поверхности земли и с постоянной температурой земной поверхности будет $\approx 15\%$, т.е. в этом эксперименте роль эффекта охлаждения Земли невелика. При других характерных временах ($\tilde{t} > 0.1$) этот эффект может играть большую роль.

1. Ковалец И. В., Мадерич В. С. Динамика и энергетика распространения тяжелого газа в приземном слое атмосферы // Прикладная гидромеханика.– 1999.– 2, N 4.– С. 12-20.
2. Ковалец И. В., Мадерич В. С. Численная трехмерная модель распространения тяжелого газа в атмосфере с использованием консервативных схем расщепления // Прикладная гидромеханика.– 2001.– 3, N 1.– С. 28-36.
3. Nielsen M., Soren O. Heat transfer in large-scale heavy-gas dispersion // J. Hazardous Materials.– 1999.– A67.– P. 41-58.
4. Зилигиневич Ю. Проникающая турбулентная конвекция.– Таллин: Валгус, 1989.– 207 с.
5. Koopman R. P., et. Description and analyses of Burro Series 40 m³ LNG spill experiments // Report.– LLNL.– 1981.– P. 41.