

СЕКЦИЯ 18
 СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ
 НЕФТИ И ГАЗА
 ПОДСЕКЦИЯ 1 МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
 ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ
 ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА, ТЕПЛА И МАССЫ В ТРУБАХ
 С.Н. Харламов

*Международная научно-исследовательская лаборатория
 «Нефтегазовая гидродинамика и теплообмен»,
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Введение. Последние декады двадцатого века связаны с развитием и распространением технологий, успешно апробированных в процессах, определивших безаварийное функционирование аппаратов и устройств в энергомашиностроении, нефтегазовой промышленности, ориентированных на детальные исследования климатической эволюции, рационального природопользования, обнаружения и предотвращения катастрофических взаимодействий внешней среды и человека. При адаптации указанных технологий остро стоит проблема разработки систем, конструктивным элементом которых является труба или сеть каналов с быстропротекающими процессами переноса импульса тепла и массы. Этапы преобразования внутренней энергии рабочей или транспортируемой газовой среды в кинетическую энергию подвижных границ устройств всегда осуществляются с определенными потерями на трение, внутри- и межфазный теплообмен. Величину этих потерь требуется оптимизировать и минимизировать на стадиях разработки и проектирования трубопроводных систем. В структуре потерь можно выделить функционально регулируемую и диссипативную части. К первым относятся потери, требующие уменьшения за счёт изменений геометрии рабочего органа аппарата, условий начального состояния параметров транспортируемого рабочего газа, массы подвижной границы устройства и др. *Диссипативные потери* связаны с необратимыми процессами перехода энергии химических связей в кинетическую, тепловую и обратно. Такие потери поддаются управлению сравнительно меньше.

Цель исследования. В настоящей работе обсуждаются процессы тепло и массообмена в элементах трубопроводных систем, аппаратах с подвижной границей, в которых проявляются диссипативные потери. Результат изучения этих процессов выходит за рамки, в которых происходит корректировка рабочих характеристик. Использование термо-, гидро и газодинамических моделей быстрых явлений связано с более глубоким проникновением в суть взаимосвязанных физических процессов, сопровождающих функционирование системы труб. Последние определяются эффектами интенсивного теплового воздействия потока газов на стенку каналов, осложнены химией, термической деградацией поверхности канала, засорения транспортируемого продукта частицами металла и т.д. Таким образом, на состоянии рабочей среды в узлах систем труб оказывает влияние движение газов, интенсивность переносов тепла, массы, химические реакции, турбулентность. С учётом отмеченных особенностей в работе анализируются достижения в детальном моделировании быстроменяющихся режимов течений, отмечаются достоинства инженерных подходов и моделей описания рассматриваемых явлений.

Детали моделирования. Отмечается, что в рамках RANS-подхода [1] в расчетах турбулентности в системе труб будет вполне успешна дифференциальная модель, учитывающая изменения локальных свойств вихря и базирующаяся на уравнениях для кинетической энергии турбулентных флуктуаций (k), интегрального масштаба турбулентности (L), а также уравнениях для среднеквадратичных значений пульсаций поперечной компоненты компоненты скорости $\overline{v'^2}$ и энтальпии $\overline{h'^2}$ [2]:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\mu + b_1 \mu_i) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \mu_i \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 - b_2 (\mu + b_1 \mu_i) \frac{k}{L^2}; \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial L}{\partial t} + U \frac{\partial L}{\partial x} + V \frac{\partial L}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\mu + b_3 \mu_i) \frac{\partial L}{\partial r} \right] - b_4 \frac{L}{k} \mu_i \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + B b_5 \sqrt{k} \rho \left(1 - \frac{L^2}{(R-r)^2} \right); \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \overline{h'^2}}{\partial t} + U \frac{\partial \overline{h'^2}}{\partial x} + V \frac{\partial \overline{h'^2}}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho (a + b_6 a_i) \frac{\partial \overline{h'^2}}{\partial r} \right] + b_7 \rho \sqrt{v'^2} \sqrt{\overline{h'^2}} \frac{\partial h}{\partial r} - b_8 \rho a \frac{\overline{h'^2}}{L_h^2} - b_9 \rho \frac{\sqrt{k}}{L_h} \overline{h'^2}; \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial t} + U \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial x} + V \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\mu + b_1 \mu_i) \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial r} \right] + b_{11} \rho \frac{k^{3/2}}{L} \overline{v'^2} - b_{12} \mu \frac{\overline{v'^2}}{L^2} - 2 \rho v'^2 \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{\partial \mu}{\partial r} \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial r}. \quad (4)$$

Здесь значения констант b_i ($i=1,12$) выбраны в результате оптимизации вычислений при анализе автомодельных распределений для осредненных характеристик турбулентности. При этом коэффициент турбулентного переноса импульса μ_i определяется зависимостью [1,2]:

$$\mu_i / \mu = \alpha \text{Re}_i \left[1 - \exp(-\sigma_2 \text{Re}_i^2) + \sigma_3 \text{Re}_i^{3/2} \exp(-\sigma_1 \text{Re}_i^2) \right], \quad \text{Re}_i = \rho \sqrt{\varphi k} L / \mu \quad (5)$$

где φ - доля энергии турбулентных молей, ответственных за обменные процессы, которая находится следующим образом:

$$\varphi = 1 - \exp\left(-\frac{K}{K_0} \frac{t}{t_i}\right). \quad (6)$$

Здесь K есть константа, определяемая как результат согласования с опытными данными [598]; $t_i = L/\sqrt{k}$ - время турбулентных пульсаций, рассчитанное по локальным значениям характеристик турбулентности; $K_0 = D/l_K^0$ - параметр нестационарности; l_K^0 - начальная длина камеры.

Турбулентный поток тепла можно представить в виде [1]:

$$v'h' = b\sqrt{v'^2} \sqrt{h'^2}, \quad b = \text{const}. \quad (7)$$

Тогда в случае течения двухкомпонентной среды и при наличии "глубоко равновесных" реакций (приближенно с учетом допущения $\frac{\partial c}{\partial T} T' \gg \frac{\partial c}{\partial P} P'$) имеем

$$a_i = \left(b\sqrt{v'^2} \sqrt{h'^2} + \frac{a}{2} (Le-1) \Delta c_p \frac{\partial \bar{c}^2}{\partial r} \frac{\partial c}{\partial T} \right) / \frac{\partial h}{\partial r}, \quad \bar{c}^2 = \left(\frac{\partial c}{\partial T} \right)^2 h'^2 / c_{p,eff}^2, \quad c_{p,eff} = c_p + \frac{\partial c}{\partial T} \Delta h. \quad (8)$$

В отношении метода решения определяющих уравнений (детали см. [1]) отмечается: целесообразна замена независимых переменных на новые, следующие за движением границы:

$$\{t, x, r\} \rightarrow \{t_1, \xi, \eta\}; \quad t_1 = t, \quad \xi = \int_{x_{cm}}^x \rho S dx, \quad \eta = \ln(R - r + \Delta); \quad (\text{в области занятой газом}) \quad (9)$$

$$\text{и } \{t, r\} \rightarrow \{t_1, \eta_1\}; \quad t_1 = t, \quad \eta_1 = \ln(r - R + \Delta_1) \quad (\text{в стенке}), \quad \text{где } \Delta, \Delta_1 - \text{параметры преобразования.} \quad (10)$$

В работе детально излагаются **идеи численного метода** решения указанных задач. В частности, используется подход, в рамках которого на каждом временном шаге решение строится в два этапа. На первом – интегрируются усредненные определяющие уравнения баланса импульса и тепла, находятся давление и все усредненные характеристики течения на новом слое по времени. На втором – двумерные распределения искомых параметров по полным уравнениям Рейнольдса и энергии. Из-за существенной нелинейности задачи на каждом временном слое и в каждой точке пространства организуются итерации: локальные при определении концентраций компонент смеси и глобальные, контролируемые по точности расчета температуры, которая, в свою очередь, пересчитывается по известному полю энтальпии [1].

Результаты и их обсуждение. В работе детально исследовалась турбулентная структура инертного и химически реагирующего потока в канале с подвижной границей. Расчетами установлено существенное отличие характеристик турбулентности от своих автоматических значений и определены размеры зон повышенной интенсивности турбулентных флуктуаций. Большой частью турбулизированные участки сосредоточены в областях, примыкающих к подвижному фронту за движущейся границей. Пульсации теплогидродинамических параметров в ядре потока практически отсутствуют, вклад турбулентной диффузии в перенос от стенок в ядро ограничен условиями быстрого протекания процессов ($t_r \approx 10^{-3}$ с). Поведение интегральных параметров процесса имеют вид, приведенный на рис. 1

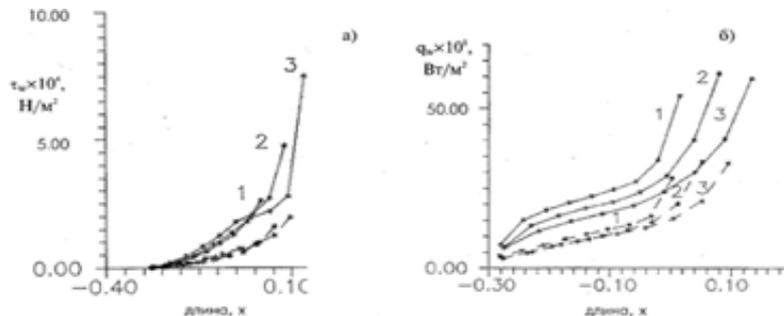


Рис. 1. Распределения по длине канала в метрах (запоршневая область) напряжения трения (а) и теплового потока (б) в различные моменты времени: $t/t_0 = 5$ (линия 1); 8 (2); 10 (3) для реагирующего (сплошная) и замороженного (пунктир) течений

Следует отметить, что химические реакции в быстрых процессах течения заметным образом сказываются на значениях τ_w и q_w , но при этом не меняют качественного характера распределений этих параметров.

Литература

1. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. - Томск: Изд-во ТГУ, 2001. - 440 с.
2. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Modelling of Complex Shear Flow Structure in Pipelines // International Journal of Engineering, Science and Innovative Technology, 2014. – Vol. 3, - Iss. 6. – С. 500-509,