



УДК 536.248.1

Д. А. Романюк, С. В. Панфилов, Д. С. Громов

Решение сопряженной задачи газовой динамики и теплообмена в конструкциях с большим соотношением геометрических масштабов

В рамках выполнения научно-исследовательских работ созданы методика и программный комплекс для решения сопряженных теплогидравлических задач, основанные на использовании классического подхода к выполнению гидравлических расчетов и моделировании тепловых процессов с помощью конечно-объемного метода в программном пакете *ANSYS Fluent*. Разработанные средства позволяют эффективно рассчитывать тепловое состояние сложных технических объектов. Приведены математическое описание методики, результаты ее апробации и верификации.

Ключевые слова: теплообмен, численное моделирование, сопряженные задачи.

Введение

При разработке различных приборов, устройств и конструкций все большее значение приобретает компьютерное моделирование. Существует множество программных пакетов, позволяющих рассчитывать процессы теплообмена и гидрогазодинамики как по отдельности, так и в виде сопряженных задач. При этом стоит отметить активное развитие компьютерного моделирования в части создания все более совершенных программных кодов и увеличения вычислительных возможностей.

В то же время существуют объекты, в которых непосредственное моделирование тепловых и газодинамических процессов с использованием современных *CAE*-пакетов затруднительно из-за большого различия основных геометрических параметров. Так, например, в конструкции с габаритными размерами 20...30 м при наличии развитой сети трубопроводов диаметром 60...150 мм решение сопряженных задач теплообмена и газовой динамики только путем применения *CFD*-кодов приводит к необходимости создания конечно-объемных сеток на многие десятки или даже сотни миллионов ячеек. Это делает задачу практически нерешаемой даже на современных вычислительных кластерах. Необходимо искать иные подходы к решению задачи.

Подобная задача была поставлена перед коллективом лаборатории гидрогазодинамики и теплообмена Акционерного общества «Конструкторское бюро специального маши-

ностроения» (АО «КБСМ»). Для ее решения была предложена методика расчета сопряженной теплогидравлической задачи и разработан комплекс программ, основанный на использовании классического подхода к выполнению гидравлических расчетов и моделировании тепловых процессов с помощью конечно-объемного метода в коммерческом пакете программ *ANSYS Fluent*.

Описание методики

Рассматривается задача о тепловом состоянии бетонного массива, разогреваемого и охлаждаемого с помощью воздуха, протекающего по сложной системе трубопроводов. В результате теплообмена с бетоном температура воздуха существенно меняется по пути следования от точки входа к точке выхода. Для решения такой тепловой задачи необходимо задавать граничные условия на внутренних поверхностях труб с учетом неравномерности температуры воздуха в них. Гидравлические характеристики системы также зависят от распределения температуры воздуха.

Решение подобной задачи в нестационарной постановке только методами вычислительной гидродинамики не представляется возможным, что связано помимо прочих факторов с необходимостью применения малого шага по времени. В связи с этим необходимо использовать пакет программ, предназначенных для решения тепловой задачи в конечно-объемной постановке и гидравлического расчета в классической постановке.

Для решения тепловой части задачи и в качестве основы для разработки используется программный пакет *ANSYS Fluent*, разработанный в части интеграции с рядом соб-



ственных алгоритмов, необходимых для учета специфики процессов теплообмена в конструкции при различных режимах эксплуатации.

Гидравлический расчет систем трубопроводов выполняется с помощью разработанной в АО «КБСМ» программы *Hydra*, работающей одновременно в связке с *ANSYS Fluent* при непрерывном обмене данными. Интерфейс связи *ANSYS Fluent* и *Hydra* реализован с помощью набора пользовательских функций *UDF*.

Исходными данными для программы *Hydra* являются суммарный расход воздуха в системе (объемный или массовый) и температура воздуха на входе в систему, а также распределение температуры в окружающем массиве. Расход и температуру воздуха на входе можно задавать как функции от времени. Для задания внешних температур служит файл, в который при работе пакета *ANSYS Fluent* на каждом шаге решения записываются средние температуры окружающего бетонного массива для каждого участка системы.

В результате работы программы *Hydra* средние значения температуры воздуха и коэффициента теплоотдачи для каждого участка записываются в файл, используемый в пакете *ANSYS Fluent* для задания граничных условий на поверхности труб. При этом в процессе расчетов между программами происходит непрерывный обмен данными.

Данная методика обеспечивает адекватный учет следующих факторов и процессов:

- движение воздуха в системе труб с соответствующей переменной теплоотдачей в бетонный массив и из него;
- изменение теплофизических свойств массива (теплопроводность и теплоемкость материалов) в процессе его прогрева;
- произвольное задание закона изменения температуры воздуха на входе в систему.

В программе *Hydra* гидравлические характеристики и параметры теплообмена определяются в соответствии с известными зависимостями из работ [1–3].

Математическая модель

Массовый расход в трубопроводах системы определяется методом контурных токов, основанном на законах Кирхгофа. В расчетной

схеме системы трубопроводов выделяется N независимых контуров, для каждого из которых должно выполняться условие:

$$\sum_{j=1}^{M_i} \Delta P_j = 0, \quad i = 1, \dots, N,$$

$$\Delta P_j = \left(\zeta_{mj} + \lambda_j \frac{L_j}{d_j} \right) \frac{G_j |G_j|}{2\rho_j F_j^2},$$

$$\lambda_j = \lambda_j(\text{Re}_j), \quad \text{Re}_j = \frac{|G_j| d_j}{\mu_j F_j},$$

$$\rho_j = \frac{P_j}{RT_{sj}}, \quad \mu_j = 1,71 \cdot 10^{-5} \frac{390}{T_{sj} + 117} \left(\frac{T_{sj}}{273} \right)^{3/2},$$

где M_i – количество участков в i -м контуре;
 ΔP_j – потери полного давления на j -м участке контура;

ζ_{mj} – суммарный коэффициент местных сопротивлений на j -м участке контура;

λ_j – коэффициент сопротивления трения на j -м участке контура;

L_j – длина j -го участка контура;

d_j – гидравлический диаметр j -го участка контура;

G_j – массовый расход воздуха на j -м участке контура ($G_j > 0$, если направление течения совпадает с направлением обхода контура, в противном случае – $G_j < 0$);

ρ_j – плотность воздуха при температуре T_{sj} ;

F_j – площадь проходного сечения j -го участка контура;

μ_j – динамическая вязкость воздуха при температуре T_{sj} ;

P_j – статическое давление;

R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287,1$ Дж/(кг·К));

T_{sj} – средняя температура воздуха на j -м участке.

Полученная система нелинейных уравнений замыкается балансовыми соотношениями для расходов в узлах

$$\sum_{j=1}^{N_k} G_j = 0,$$



где N_k – число участков, сходящихся в k -м узле;

$G_j > 0$, если поток направлен к узлу, в противном случае – $G_j < 0$.

Данная система нелинейных уравнений решается итерационно одним из стандартных способов. В результате определяются параметры всех участков гидравлической системы.

На каждой итерации решения системы для каждого участка определяется температура T_1 воздуха на входе. Считая температуру T_e окружающего массива постоянной по длине участка, температура T_2 воздуха на выходе, средняя температура T_s воздуха на участке и средний коэффициент теплоотдачи α_s определим из соотношений:

$$\Delta T = (T_e - T_1) \left[1 - \exp\left(\frac{\alpha_s S}{C_p G}\right) \right],$$

$$T_2 = T_1 + \Delta T,$$

$$T_s = T_e - \Delta T \frac{C_p G}{\alpha_s S},$$

$$\alpha_s = 0,023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}_d^{0,8} \text{Pr}^{0,4}.$$

Здесь S – площадь поверхности теплообмена;

C_p – изобарная теплоемкость воздуха;

G – массовый расход воздуха;

λ – коэффициент теплопроводности воздуха;

d – гидравлический диаметр трубы;

Re_d – число Рейнольдса, вычисленное по гидравлическому диаметру;

Pr – число Прандтля (для воздуха $\text{Pr} = 0,7$).

Температура T_e для каждого участка определяется из решения тепловой задачи в пакете *ANSYS Fluent*, а средняя температура воздуха на участке T_s и средний коэффициент теплоотдачи α_s передаются в *ANSYS Fluent* в качестве граничных условий на каждом расчетном шаге.

Апробация и верификация

Апробация и верификация расчетной методики и программного средства были проведены на основе экспериментальных работ по

исследованию тепловых режимов фрагмента конструкции. Этот фрагмент включает металлоконструкцию, трубопроводы разогрева, бетонный наполнитель, армированный центральный наполнитель, тепловую изоляцию и геометрически представляет собой сектор с углом в плане 45° и размером по высоте ~ 5 м.

Эксперимент по прогреву фрагмента проводился по циклограмме разогрева на протяжении 120 суток, при этом велась непрерывная запись показаний термодатчиков, расположенных в ключевых точках конструкции.

Разработанная трехмерная геометрическая модель включает все основные конструктивные элементы экспериментального стенда. Допущения и приближения, сделанные при создании расчетной модели, граничные условия, свойства материалов и циклограмма разогрева были приняты, исходя из максимального их соответствия условиям проведения эксперимента.

Сравнение производилось по 30 точкам, расположенным на семи измерительных уровнях. В качестве примера на рисунке приведены результаты расчета в сравнении с показаниями датчиков на одном из них.

Сравнение графиков изменения температуры во времени в характерных точках конструкции показывает качественное подобие результатов расчета и экспериментальных данных. Сравнение температур в момент времени 120 суток (установившееся тепловое состояние или близкое к нему) показывает расхождение результатов расчета и эксперимента по температуре не более 12 %. В целом результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет считать методику и разработанное программное средство пригодными для расчетов подобных конструкций.

Кроме того, было проведено сравнение результатов решения тестовой задачи «труба в бетоне» с помощью разработанной методики и путем непосредственного решения сопряженной задачи в программном пакете *ANSYS Fluent*.

Рассмотрена задача о стационарном течении горячего воздуха в трубе диаметром

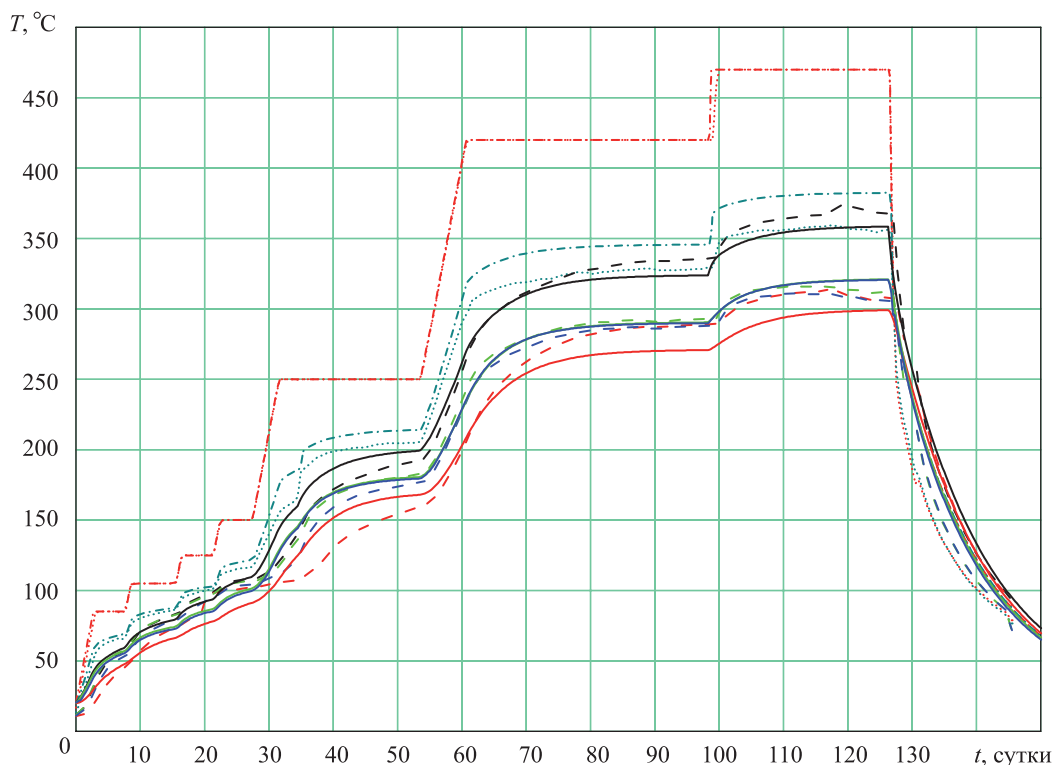


Рисунок. Сравнение результатов расчета с показаниями датчиков:

....., - - - - Т1 (эксп., расчет); , - - - - Т3 (эксп., расчет);
 - - -, — — — — ТБ-10.7 (эксп., расчет); - - -, — — — — ТБ-10.8 (эксп., расчет);
 - - -, — — — — ТМ-10.11 (эксп., расчет); - - -, — — — — ТМ-10.12 (эксп., расчет)

68 мм, находящейся внутри цилиндрического бетонного массива диаметром 500 мм и длиной 5 м. На входе в трубу заданы скорость движения воздуха 8 м/с и его температура 480° С. На внешней границе бетонного массива действует граничное условие конвекции.

Расчетная область была разбита на тетраэдральные ячейки, при этом около стенки внутри трубы использовались призматические ячейки для разрешения пограничного слоя. Расчеты проводились на сетках с различным размером ячеек с помощью нескольких моделей турбулентности.

В таблице приведены значения удельного теплового потока (Вт/м²) от горячего воздуха в бетонный массив, полученный с помощью разных подходов. Здесь введены следующие обозначения: *Hydra* – решение с помощью разработанной методики; *NS* – уравнения Навье – Стокса (без модели турбулентности); *SA* – модель Спаларта – Аллмараса; *SST* – модель *k – ω* SST Ментера; *KE* – модель *k – ε*; *KE_ew* модель *k – ε* с улучшенными пристеночными функциями; *KE_av* – среднее значение между двух моделей *k – ε*; Δ – отклонение результата расчета от решения с помощью *Hydra*.

Результаты расчетов удельного теплового потока

Размер ячеек, мм	Призм. слой, мм	Число ячеек, тыс.	<i>Hydra</i>	<i>NS</i>	<i>SA</i>	<i>SST</i>	<i>KE</i>	<i>KE_ew</i>	<i>KE_av</i>
10	–	900	2827	1430	2477	2537	2928	2690	2809
5	0,5	3900	2829	1405	2402	2318	3124	2611	2868
3	0,3	8200	2825	1571	2312	2342	3192	2618	2905
2	0,2	18200	2825	1811	2270	2365	3198	2652	2925
Отклонение результатов расчета от решения с помощью <i>Hydra</i>									
Δ , %					–12,3	–10,2	3,6	–4,8	–0,6



Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что:

- использование уравнений Навье – Стокса дает заведомо заниженные тепловые потоки, поскольку рассматриваемое течение является турбулентным;
- все рассмотренные модели турбулентности дают отклонение от базового варианта (*Hydra*) в пределах $(-12,3 \dots +3,6) \%$;
- модель Спаларта – Аллмараса является наиболее простой из всех рассмотренных и дает наибольшее отклонение;
- сравнение результатов для остальных моделей показывает сравнительно небольшое отклонение;
- интегральные зависимости, заложенные в модель расчета *Hydra*, рекомендованы для проведения теплогидравлических расчетов и дают погрешность в пределах $3 \dots 5 \%$.

Исходя из сказанного выше, заключим, что с помощью программы *Hydra* можно вычислять тепловой поток с погрешностью не более $3 \dots 5 \%$.

Заключение

Разработанная методика позволяет проводить численное моделирование теплогидравлических процессов в крупномасштабных конструкциях, которые охлаждаются или разогреваются с помощью системы труб с газообразным или жидкостным теплоносителем.

Методика предназначена для стационарных и нестационарных расчетов тепловых режимов конструкций, определения температурных полей в различных режимах эксплуатации с учетом сопряженной постановки задачи теплообмена и газовой динамики

в тех случаях, когда прямое решение задачи с применением существующих *CFD*-кодов нецелесообразно.

Данная методика имеет следующие существенные преимущества перед прямым моделированием: использование значительно меньшего количества вычислительных ресурсов; значительно более высокая скорость расчета без потери точности.

Методика верифицирована на основе экспериментальных данных и путем сравнения с прямыми *CFD*-методами расчетов. В рамках аттестации данной методики и программного обеспечения для использования в работах по тематике ГК «Росатом» был выпущен верификационный отчет и подготовлен паспорт программного средства.

С помощью описанной методики успешно проведены расчеты различных стационарных и нестационарных тепловых режимов металлобетонной конструкции диаметром 28 м и высотой 20 м, плотно заполненной оборудованием и развитой сетью трубопроводов для прокачки воздуха диаметром 60...150 мм.

Список литературы

1. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
2. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи / Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Поступила 30.11.17

Романюк Денис Андреевич – заместитель начальника лаборатории газодинамики и теплообмена Акционерного общества «Конструкторское бюро специального машиностроения», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: газо- и гидродинамика, процессы тепло- и массообмена, течения газозвесей, вычислительные методы.

Панфилов Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, главный специалист лаборатории газодинамики и теплообмена Акционерного общества «Конструкторское бюро специального машиностроения», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: газовая динамика технических систем, течения газозвесей, аэродинамика, теплообмен, вычислительные методы.



Громов Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории газодинамики и тепломассообмена Акционерного общества «Конструкторское бюро специального машиностроения», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: теплообмен, термостабилизация, интенсификация теплоотдачи, вычислительные методы.

Solution of the conjugate problem of gas dynamics and heat transfer in structures with a large ratio of geometric scale values

Within the scope of the research work, we have developed the methods and software package for solving the conjugate heat and hydraulic problems based on the classical approach to performing hydraulic calculations and modeling thermal processes by means of the finite volume method in the *ANSYS Fluent* software package. The developed means allowed us to efficiently calculate the thermal state of complex technical objects. The study gives mathematical formulation of the methods and suggests the results of their approbation and verification.

Keywords: heat and mass transfer, computational simulation, conjugate problems.

Romanyuk Denis Andreevich – Deputy Head of Laboratory of Gas Dynamics and Heat and Mass Transfer, Joint Stock Company Design Bureau for Special Mechanical Engineering, Saint Petersburg.

Science research interests: gas- and hydrodynamics, heat and mass transfer processes, gas-particle flows, computational methods.

Panfilov Sergey Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Chief Specialist of Laboratory of Gas Dynamics and Heat and Mass Transfer, Joint Stock Company Design Bureau for Special Mechanical Engineering, Saint Petersburg.

Science research interests: gas dynamics of technical systems, gas-particle flows, aerodynamics, heat exchange, computational methods.

Gromov Dmitriy Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory of Gas Dynamics and Heat and Mass Transfer, Joint Stock Company Design Bureau for Special Mechanical Engineering, Saint Petersburg.

Science research interests: heat exchange, thermal stabilization, heat transfer intensification, computational methods.