

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ К РЕШЕНИЮ ПЛОСКИХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ КРЫЛА*

Д.Н. ГОРЕЛОВ, Ю.С. СМОЛИН

Институт информационных технологий

и прикладной математики СО РАН, Омск, Россия

e-mail: gorelov@iitam.omsk.net.ru, smolin@iitam.omsk.net.ru

A system of two integral equations is suggested for the intensities of the vortex layers on the upper and lower sides of the airfoil making it possible to solve two-dimensional problems of stationary and non-stationary flow past the body allowing for the potential hydrodynamic interaction between the airfoil and other bodies and the flow boundaries. The efficiency of this system of equations if applied instead of the input singular equations of the first and second kind has been estimated.

Введение

Плоские краевые задачи теории крыла сводятся обычно к решению сингулярных интегральных уравнений первого или второго рода. Эти уравнения имеют параметрическую особенность, связанную с толщиной профиля, что может привести к большой погрешности численного решения вблизи его кромок (см., например, [1, 3]).

В работе [2] для решения задач стационарного обтекания профиля безграничным потоком несжимаемой жидкости получена система интегральных уравнений (СИУ), не имеющих указанной параметрической особенности.

В настоящей работе предложенная в [2] система интегральных уравнений обобщена на случай обтекания профиля с учетом возможного гидродинамического взаимодействия профиля с другими телами и границами потока. Путем численного эксперимента оценена эффективность применения системы интегральных уравнений вместо исходных уравнений первого и второго рода.

1. Система интегральных уравнений

Рассмотрим задачу обтекания профиля нестационарным потенциальным потоком идеальной несжимаемой жидкости, в которой могут находиться и перемещаться другие тела, границы раздела сред и иные источники возмущений. При сделанных предположениях поле скоростей жидкости может быть описано комплексной скоростью $\bar{v}(z, t)$, $z = x + iy$,

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №96-01-00093.

© Д. Н. Горелов, Ю. С. Смолин, 1999.

являющейся аналитической функцией в области течения вне контура профиля $L(t)$, других границ потока и возможных особых точек. Комплексную скорость $\bar{v}(z, t)$ представим в виде

$$\bar{v}(z, t) = \bar{v}_\infty + \Delta\bar{v}(z, t) + \frac{1}{2\pi i} \int_L \frac{\gamma(s, t) ds}{z - \zeta(s, t)}, \quad \zeta \in L(t). \quad (1)$$

Здесь \bar{v}_∞ — комплексная скорость жидкости в бесконечно удаленной точке, s — дуговая координата точки $\zeta(s, t)$, $\gamma(s, t)$ — интенсивность вихревого слоя, моделирующего контур $L(t)$, $\Delta\bar{v}(z, t)$ — комплексная скорость возмущенного движения жидкости, создаваемого другими телами, границами потока, а также вихревыми следами (линиями контактного разрыва), сходящими с профиля при изменении циркуляции скорости вокруг него с течением времени t .

Пусть теперь точка $z \in L(t)$. Применяя в (1) к интегралу типа Коши формулы Племелья, получим

$$\bar{v}(z, t) = \bar{U}(z, t) - \frac{1}{2} \gamma(s, t) e^{-i\theta(s, t)}, \quad z \in L(t), \quad (2)$$

где интеграл по $L(t)$ в (1) понимается в смысле главного значения по Коши, \bar{U} — комплексная скорость движения точек контура $L(t)$, $\theta(s, t)$ — угол между касательной к $L(t)$ и осью x . Умножая (2) на $\exp\{i\theta(s, t)\}$ и разделяя в полученном выражении вещественную и мнимую части, придем к двум сингулярным интегральным уравнениям относительно функции $\gamma(s, t)$:

$$\text{Im}\{e^{i\theta(s, t)}[\bar{v}(z, t) - \bar{U}(z, t)]\} = 0, \quad z \in L(t), \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \gamma(s, t) + \text{Re}\{e^{i\theta(s, t)}[\bar{v}(z, t) - \bar{U}(z, t)]\} = 0, \quad z \in L(t). \quad (4)$$

Уравнение (3) определяет собой условие непротекания жидкости через контур $L(t)$ (равенство нулю нормальной составляющей относительной скорости) и является интегральным уравнением первого рода. Уравнение (4) налагает ограничения на касательную составляющую относительной скорости жидкости вдоль контура $L(t)$ и является интегральным уравнением второго рода.

В предельном случае бесконечно тонкого профиля каждое из уравнений (3), (4) принимает одинаковые значения на верхней и нижней сторонах профиля. Эту параметрическую особенность, связанную с толщиной профиля, можно исключить, переходя от независимых уравнений (3), (4) к системе совместных интегральных уравнений специального вида. Следуя работе [2], запишем уравнения (3), (4) на верхней $L_1(t)$ и нижней $L_2(t)$ сторонах профиля. Беря разность соответствующих выражений, придем к следующей системе интегральных уравнений относительно интенсивностей вихревых слоев на верхней $\gamma_1(s, t)$ и нижней $\gamma_2(s, t)$ сторонах профиля:

$$\text{Im}\{e^{i\theta(s_1, t)} \bar{v}(z_1, t) - e^{i\theta(s_2, t)} \bar{v}(z_2, t)\} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} [\gamma_1(s_1, t) - \gamma_2(s_2, t)] + \text{Re}\{e^{i\theta(s_1, t)} \bar{v}(z_1, t) - e^{i\theta(s_2, t)} \bar{v}(z_2, t)\} = 0. \quad (6)$$

Здесь точки z_1, z_2 должны соответствовать друг другу в том смысле, что в предельном случае бесконечно тонкого профиля $|z_2 - z_1| \rightarrow 0$; s_1, s_2 — дуговые координаты точек z_1, z_2 ; γ_1, γ_2 — значения γ на L_1, L_2 . Можно показать, что уравнения (5), (6) не вырождаются при уменьшении толщины профиля до нуля.

Следует отметить, что комплексная скорость $\Delta\bar{v}(z, t)$, входящая в выражение (1) для $\bar{v}(z, t)$, в общем случае является неизвестной функцией, для определения которой требуются дополнительные соотношения. Ими могут быть, в частности, граничные условия на других телах, вихревых следах и границах раздела сред.

2. Решение интегральных уравнений методом панелей

Интегральные уравнения (3), (4) и систему уравнений (5), (6) будем решать методом панелей с линейным распределением интенсивности вихревых слоев. Выберем на контурах L_1, L_2 точки $z_m^{(1)}, z_m^{(2)}, m = 0, \dots, N$, полагая $z_0^{(1)} = z_0^{(2)} = z_A$, $z_N^{(1)} = z_N^{(2)} = z_B$, где z_A, z_B — комплексные координаты передней и задней кромок профиля. Следуя методу панелей, заменим контуры L_1, L_2 панелями K_{rj} , соединяющими точки $z_{j-1}^{(r)}, z_j^{(r)} \in L_r; j = 1, \dots, N, r = 1, 2$. Обозначим через $\gamma_j^{(r)}$ значения интенсивности вихревого слоя на стыках панелей (в точках $z_j^{(r)}$). Комплексная скорость $\bar{v}(z, t)$, индуцированная панелями, вычисляется по формулам

$$\bar{v}(z, t) = \bar{v}_\infty + \Delta\bar{v}(z, t) + \sum_{r=1}^2 \sum_{j=0}^N \gamma_j^{(r)}(t) \left[P_j^{(r)}(z) + Q_j^{(r)}(z) \right], \quad (7)$$

где $P_N^{(r)}(z) = 0, Q_0^{(r)} = 0$,

$$P_j^{(r)}(z) = \frac{e^{-i\theta_{rj+1}}}{2\pi i} \left[1 + \frac{z - z_{j+1}^{(r)}}{z_{j+1}^{(r)} - z_j^{(r)}} \ln \frac{\lambda_1 (z - z_{j+1}^{(r)})}{z - z_j^{(r)}} \right], \quad j = 0, \dots, N-1,$$

$$Q_j^{(r)}(z) = -\frac{e^{-i\theta_{rj}}}{2\pi i} \left[1 + \frac{z - z_{j-1}^{(r)}}{z_j^{(r)} - z_{j-1}^{(r)}} \ln \frac{\lambda_2 (z - z_{j-1}^{(r)})}{z - z_{j-1}^{(r)}} \right], \quad j = 1, \dots, N. \quad (8)$$

Здесь $\lambda_1 = -1$, если $z \in K_{rj+1}$, иначе $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = -1$, если $z \in K_{rj}$, иначе $\lambda_2 = 1$.

Контрольные точки $z_{0k}^{(p)}$ на панелях K_{pk} в общем случае будем размещать на расстоянии $\nu_r \Delta_k^{(p)}$ от начала панели:

$$z_{0k}^{(p)} = z_{k-1}^{(p)}(1 - \nu_k) + z_k^{(p)}\nu_k, \quad 0 < \nu_k < 1; \quad \Delta_k^{(p)} = \left| z_k^{(p)} - z_{k-1}^{(p)} \right|, \quad k = 1, \dots, N, \quad p = 1, 2. \quad (9)$$

Подставляя (7), (8) в уравнения (3), (4) и (5), (6) и требуя выполнения этих уравнений в контрольных точках (9), получим соответственно следующие системы из $2N$ линейных алгебраических уравнений с вещественными коэффициентами относительно $2(N+1)$ величин $\gamma_0^{(1)}, \dots, \gamma_N^{(1)}, \gamma_0^{(2)}, \dots, \gamma_N^{(2)}$:

$$\sum_{r=1}^2 \sum_{j=0}^N \gamma_j^{(r)} b_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(p)} \right) = -\text{Im} \left\{ c \left(z_{0k}^{(p)} \right) \right\}, \quad k = 1, \dots, N, \quad p = 1, 2; \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} \left[(1 - \nu_k) \gamma_{k-1}^{(p)} + \nu_k \gamma_k^{(p)} \right] + \sum_{r=1}^2 \sum_{j=0}^N \gamma_j^{(r)} a_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(p)} \right) = -\text{Re} \left\{ c \left(z_{0k}^{(p)} \right) \right\}, \quad k = 1, \dots, N, \quad p = 1, 2; \quad (11)$$

$$\sum_{r=1}^2 \sum_{j=0}^N \gamma_j^{(r)} \left[b_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(1)} \right) - b_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(2)} \right) \right] = -\text{Im} \left\{ c \left(z_{0k}^{(1)} \right) - c \left(z_{0k}^{(2)} \right) \right\}, \quad k = 1, \dots, N; \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} \left[(1 - \nu_k) \left(\gamma_{k-1}^{(1)} - \gamma_{k-1}^{(2)} \right) + \nu_k \left(\gamma_k^{(1)} - \gamma_k^{(2)} \right) \right] + \sum_{r=1}^2 \sum_{j=0}^N \gamma_j^{(r)} \left[a_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(1)} \right) - a_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(2)} \right) \right] = -\operatorname{Re} \left\{ c \left(z_{0k}^{(1)} \right) - c \left(z_{0k}^{(2)} \right) \right\}, \quad k = 1, \dots, N. \quad (13)$$

Здесь

$$a_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(p)} \right) + i b_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(p)} \right) = (-1)^{p+1} e^{i\theta_{pk}} \left[P_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(p)} \right) + Q_j^{(r)} \left(z_{0k}^{(p)} \right) \right],$$

$$c \left(z_{0k}^{(p)} \right) = (-1)^{p+1} e^{i\theta_{pk}} \left[\bar{v}_\infty + \Delta \bar{v} \left(z_{0k}^{(p)} \right) \right], \quad e^{i\theta_{pk}} = \left(z_k^{(p)} - z_{k-1}^{(p)} \right) / \Delta_k^{(p)}.$$

К каждой системе (10), (11) и (12), (13) следует добавить дополнительные уравнения, связанные с решением конкретной задачи. В частности, при решении задачи стационарного обтекания профиля такими соотношениями являются

$$\gamma_0^{(1)} - \gamma_0^{(2)} = 0, \quad \gamma_N^{(1)} + \gamma_N^{(2)} = 0. \quad (14)$$

Первое из них определяет собой условие непрерывности вихревого слоя в передней кромке профиля, а второе следует из постулата Кутты — Жуковского.

3. Результаты численного эксперимента

Перейдем к сравнительной оценке эффективности применения интегральных уравнений (3), (4) и системы уравнений (5), (6) к решению плоских задач теории крыла. В качестве тестовой выберем задачу стационарного обтекания профилей Жуковского, для которой известно точное решение [2]. Численное решение этой задачи с помощью интегрального уравнения первого рода приводит к системе алгебраических уравнений (10), (14), с помощью интегрального уравнения второго рода — к СЛАУ (11), (14), а с помощью системы интегральных уравнений (5), (6) — к СЛАУ (12) — (14).

Предварительные расчеты показали, что выбор контрольных точек в середине панелей ($\nu_k = 1/2$, $k = 1, \dots, N$) дает хорошие результаты для тех систем алгебраических уравнений, которые соответствуют интегральному уравнению первого рода. Для решения же систем уравнений, соответствующих интегральному уравнению второго рода, контрольные точки следует выбирать не в середине, а на $3/4$ длины каждой панели.

Численный эксперимент проводился для несимметричных профилей Жуковского с относительной толщиной 12% и 0,5%. Все СЛАУ для каждого профиля решались с одинаковым выбором панелей и контрольных точек. Число разбиений N варьировалось от 10 до 80. При $N \geq 20$ относительная погрешность расчета величин $\gamma_j^{(r)}$ практически не менялась.

На рис. 1 представлены результаты расчета распределения по профилю квадрата безразмерной скорости жидкости $(v/v_\infty)^2$ для угла атаки 10° , $N = 40$ по трем вариантам, соответствующим применению сингулярных уравнений первого рода (а), второго рода (б) и предлагаемой системы СИУ (в). Относительная погрешность расчета скорости жидкости вдоль верхней стороны профиля для тех же вариантов показана на рис. 2.

Приведенные результаты показывают, что точность решения задачи обтекания профиля с помощью интегральных уравнений первого и второго рода существенно зависит от толщины профиля. А именно, с уменьшением толщины профиля растет погрешность расчета. При этом для уравнения первого рода максимальная погрешность имеет место в

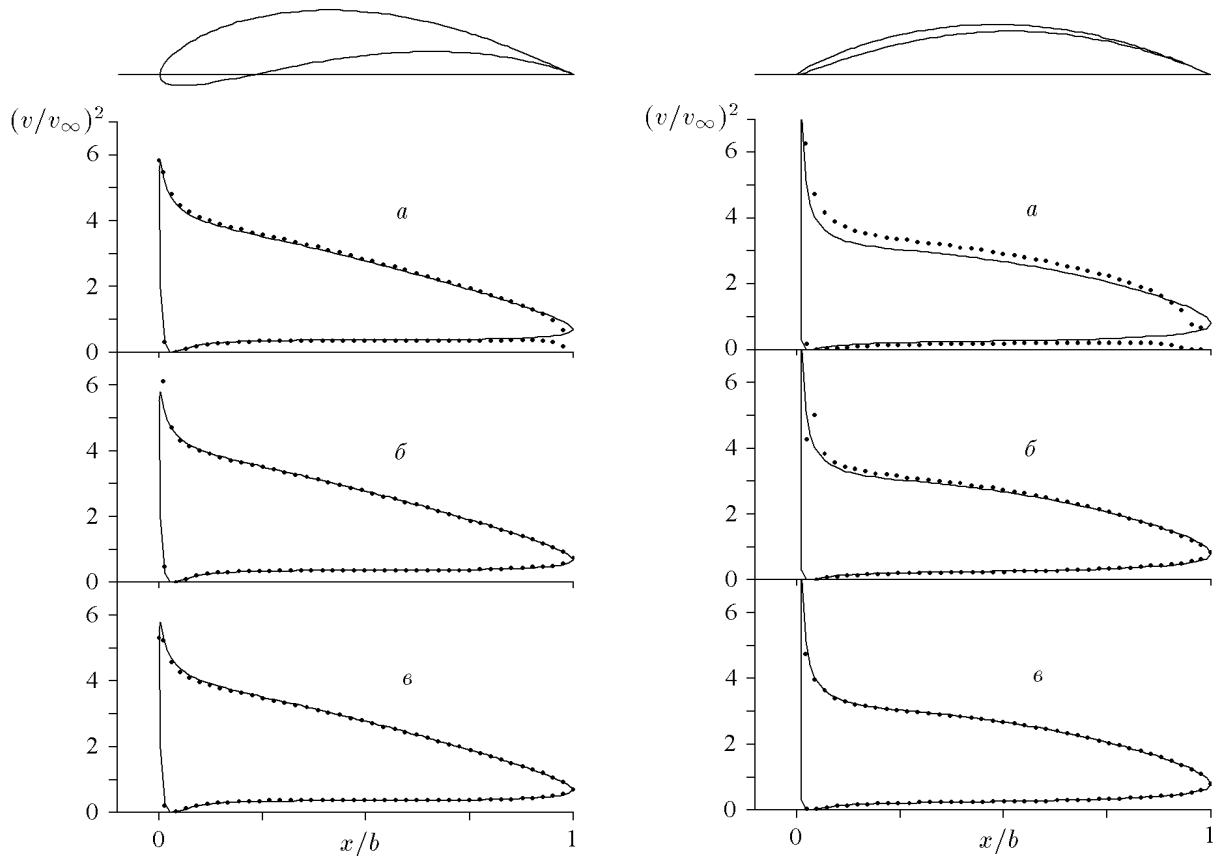


Рис. 1. Распределение квадрата безразмерной скорости вдоль контура профилей Жуковского. Сплошная линия — точное решение, точки — приближенное решение СИУ первого рода (а), СИУ второго рода (б) и системы СИУ (в).

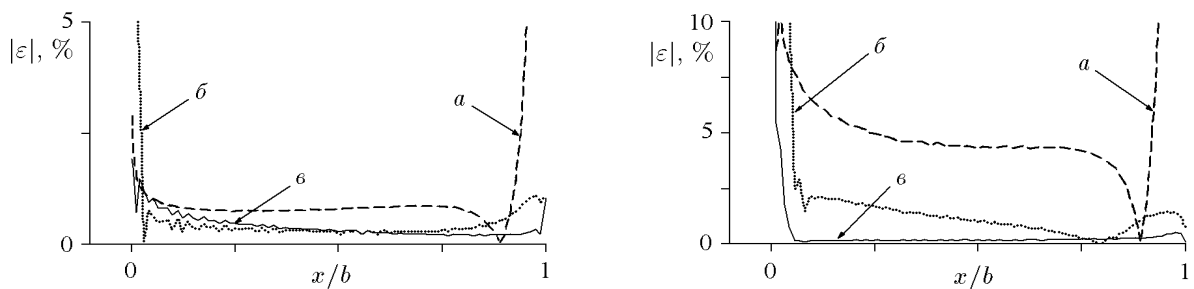


Рис. 2. Относительная погрешность расчета распределения скорости жидкости на верхней стороне профиля для вариантов а, б, в.

окрестности задней кромки, где толщина профиля наименьшая, а для уравнения второго рода — вблизи передней кромки, где радиус кривизны наименьший. Что касается расчета с помощью предлагаемой системы интегральных уравнений, то он сохраняет высокую точность для всех толщин профиля.

Список литературы

- [1] БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ С. М., КОТОВСКИЙ В. Н., НИШТ М. И., ФЕДОРОВ Р. М. *Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел*. Наука, М., 1988.
- [2] ГОРЕЛОВ Д. Н. Об интегральных уравнениях задачи обтекания профиля. *Изв. РАН, МЖТ*, №2, 1992, 173–177.
- [3] РЯБЧЕНКО В. П., САРЕН В. Э. К расчету аэродинамических характеристик решеток профилей произвольной формы. *Изв. АН СССР, МЖТ*, №2, 1972, 105–112.
- [4] YUKMELEN M. A., ERIM M. Z. A general iterative method to design Karman—Trefftz and Joukowsky airfoils. *Num. Meth. in Engineering, Int. J.*, **20**, No. 7, 1984, 1349–1368.

*Поступила в редакцию 17 ноября 1998 г.,
в переработанном виде 6 января 1999 г.*

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ БОЛЬШИХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

А. В. ЕДЕЛЕВ, С. М. ЕНИКЕЕВА, С. М. СЕНДЕРОВ

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН

Иркутск, Россия

e-mail: enikeeva@isem.sei.irk.ru

The article is devoted to the information support for reliability studies of large piping and feed systems and conduits. The respective database and the development principles of the graphic interface are described.

Введение

Актуальность исследований состояния и функционирования больших трубопроводных систем энергетики в различных условиях, а также определения “узких мест” в обеспечении потребностей в энергоресурсах в настоящее время весьма высока. Это связано со значительным количеством угроз процессу нормального топливо- и энергоснабжения (изношенность оборудования, чрезмерная концентрация транспортных коммуникаций, политические акции и т. д.). Под узким местом мы понимаем тот элемент системы, который ограничивает производственные возможности последней. При этом узкое место представляет собой не обязательно сам аварийный элемент, но узел или транспортную дугу, ограничивающую маневр по переадресации потоков энергоресурса для удовлетворения потребителя. По сути это оптимизационная задача, и в той или иной постановке она решалась многими авторами [2, 3].

В Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН разработана программно-вычислительная система “Нефть и газ России”, включающая в себя модели, имитирующие поведение Единой системы газоснабжения (ЕСГ) и систем нефте- и нефтепродуктоснабжения (ЕСН) в нештатных ситуациях, которая используется и для определения узких мест.

1. Математическая постановка задачи

Поставленная задача решается методом Басакера — Гоуэна [4] как задача о максимальном потоке минимальной стоимости с ограничениями по пропускной способности на дугах, по объемам добычи, хранения и потребления в узлах сети. Для системы газоснабжения она имеет следующий вид:

$$\max f$$

при условиях

$$\sum_{i \in N_j^+} x_{ij} - \sum_{i \in N_j^-} x_{ji} = \begin{cases} -f, & j = S, \\ 0, & j \neq S, t, \\ f, & j = t \end{cases}$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij} \quad \forall (i, j),$$

где f — величина суммарного потока по сети, S — номер узла общего источника, t — номер узла общего стока, N_j^+ — подмножество входящих в узел j дуг, N_j^- — подмножество выходящих из узла j дуг, x_{ij} — поток газа по дуге (i, j) , d_{ij} — пропускная способность дуги; при ограничениях

$$\sum_{(i,j)} C_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_j \leq M_j^{\text{доб}} \quad \text{для } j \in N_1 \quad (\text{объекты добычи}),$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_j \leq M_j^{\text{ПХГ}} \quad \text{для } j \in N_2 \quad (\text{объекты хранения}),$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij} \leq M_{ij}^{\text{ТР}} \quad (\text{участки транспорта } i, j),$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{i(k)} = Q_{i(k)} \quad \text{для } i = N_{3(k)}, k = (1, \dots, L) \quad (\text{объекты потребления}),$$

где C_{ij} — удельные топливно-энергетические затраты на соответствующих объектах ЕСГ, $Q_{i(k)}$ — требуемые объемы газа для потребителей разных категорий, $M_j^{\text{доб}}$ — максимальный объем добычи в j -м узле добычи, $M_j^{\text{ПХГ}}$ — максимальные запасы газа в j -м ПХГ, L — категории потребителей.

2. Описание базы данных

Для обеспечения исследователя полной и современной информацией разрабатываются базы данных. В предлагаемой работе рассматриваются данные об объектах ЕСГ и нефтепродуктоснабжения (ЕСН). Базы данных нормализованы [1], что упрощает синхронную модификацию всех хранимых копий данных, т. к. в процессе нормализации зависимости между данными прослеживаются более строго, исключаются повторы данных. Это уменьшает вероятность внесения ошибок в базу и улучшает возможность проверки данных благодаря их большей согласованности. Структура баз данных ориентирована на объекты рассматриваемых трубопроводных систем.

Для записи в базы данных выделены объекты добычи, хранения, потребления и транспорта. На рис. 1 изображена концептуальная схема базы данных об объектах ЕСГ. Базы данных других рассматриваемых в статье систем имеют подобную структуру. Информация об объектах в настоящее время содержит показатели, главным образом касающиеся возможности проведения потокораспределения, т. к. решение именно этой оптимизационной задачи дает возможность определять узкие места в сети. Ниже перечислены некоторые показатели, занесенные в базу данных. Несколько показателей можно увидеть на рис. 2.

Объектами добычи в БД — ЕСГ являются газодобывающие предприятия и нефтяные компании, вырабатывающие попутный газ; в БД — ЕСН (нефтепродукты) — нефтеперерабатывающие заводы; в БД — ЕСН (нефть) — нефтегазодобывающие управления. В качестве объектов потребления рассматриваются основные субъекты Российской Федерации, экспортные терминалы, а также некоторые наиболее крупные предприятия — потребители газа (нефти, нефтепродуктов). Объекты транспорта включают в себя компрессорные

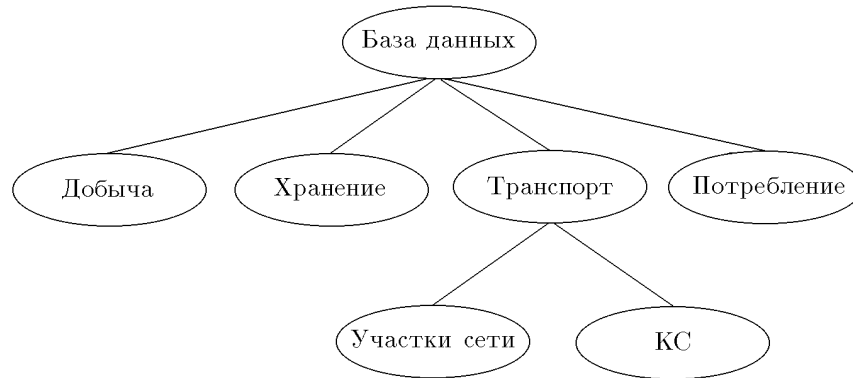


Рис. 1. Схема базы данных (газ).

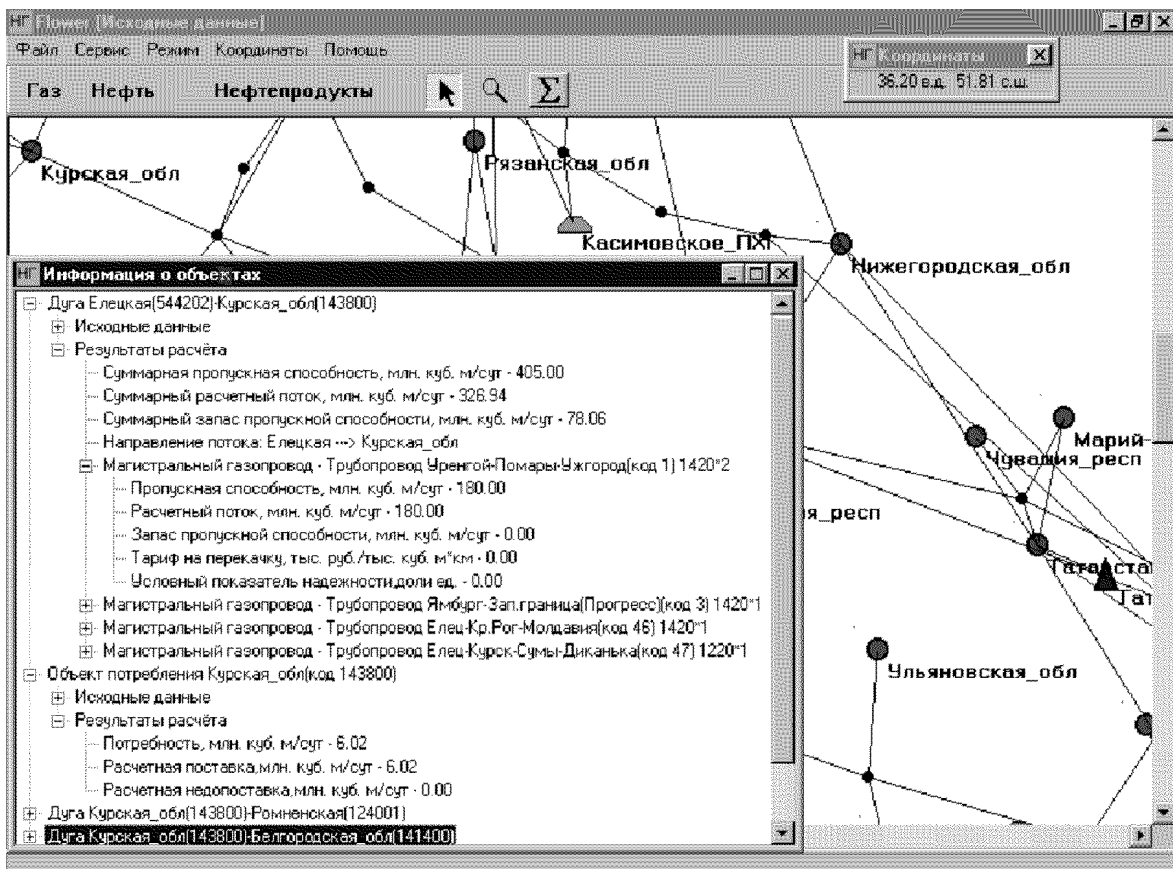


Рис. 2. Пример интерфейса пользователя.

(насосные) станции и линейную часть (трубопроводы, дискретный транспорт). Последняя представлена в виде совокупности участков, организованных в сеть, агрегированную до необходимого для исследования уровня (распределительные сети не рассматриваются). При агрегировании сети учтена принадлежность участков тому или иному трубопроводу. Это позволяет при проведении потокораспределения в вычислительном эксперименте более гибко устанавливать цены на транспортировку газа (нефти), регулируя тем самым обеспечение приоритетных потребителей в первую очередь. При разработке базы данных учтены все нитки, отражены диаметры трубопроводов. В базу данных занесены также данные о географическом расположении (долгота и широта) объектов, что позволяет сопоставить различные системы — ЕСГ, ЕСН (рис. 3).

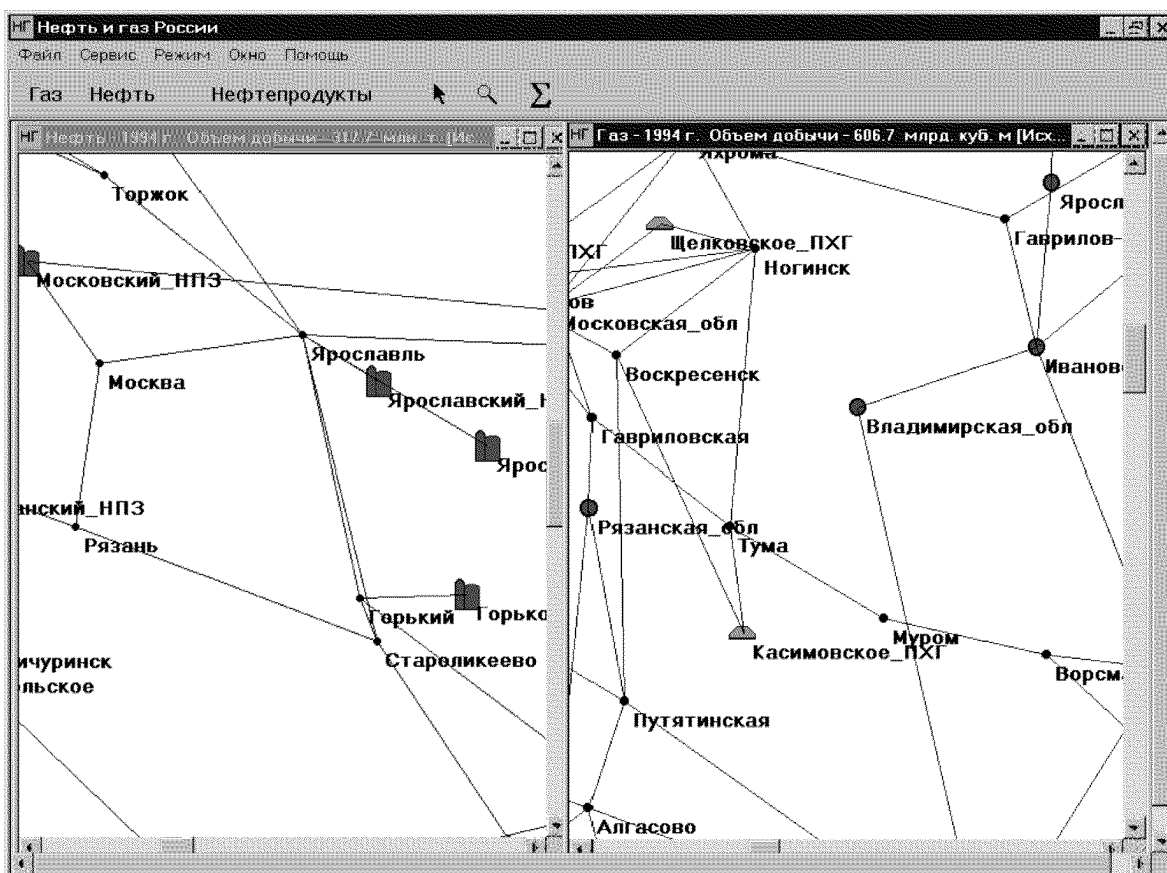


Рис. 3. Фрагмент отображения системы “Нефть и газ России”.

База данных системы “Нефть и газ России” характеризуется следующими показателями:

добывающих предприятий — по газу 28, по нефти 81 по нефтепродуктам 27;

потребителей — соответственно 73, 47, 94;

хранилищ — по газу 28;

участков — по газу 336, по нефти 288, по нефтепродуктам 366;

дуг — соответственно 582, 324, 7;

общая длина в однониточном исполнении превышает 160 тыс. км.

3. Описание интерфейса

Программа, осуществляющая интерфейс с базой, строит графическое изображение сети, дугами которого являются участки сети, а узлами — объекты добычи, хранения, потребления, точки ветвления, в которых в реальной сети располагаются компрессорные (насосные) станции. Кроме того, она дает возможность наглядного отображения на экране информации о каждом объекте: объемов добычи, хранения, потребления в соответствующих узлах, а также пропускной способности на любом участке сети, принадлежащем соответствующему трубопроводу (см. рис. 2).

Перед обработкой базы данных пользователю предлагается запустить расчетную программу, и в случае утвердительного ответа программа ждет окончания расчета. Расчетная программа формирует файл результатов. Далее создается файл настроек на базу данных. При этом одновременно осуществляется контроль данных на полноту и соответствие файлов базы данных друг другу и файлу результатов с параллельной выдачей диагностированных ошибок на экран. И только после проведения такого анализа пользователю предлагается создать (или не создавать) графические образы на экране. Диагностирование ошибок не всегда отрицает возможность построения изображения. Благодаря этому есть возможность постепенного доведения до нужного состояния (или разработки другого варианта агрегирования) такой сложной системы, как ЕСГ или ЕСН.

На одном экране могут быть открыты несколько окон, т. е., например, могут быть показаны одновременно “Нефть” и “Газ”, схема до и после расчета потокораспределения. Граф, соответствующий проведенному потокораспределению, от исходного отличается тем, что на нем дуги и объекты, которые являются препятствием для прохождения потока, изображены другим цветом. Так, красный цвет дуги означает, что использованы предельные возможности участка, синий цвет — по дуге нет потока совсем, красный цвет узла говорит о недопоставке энергоресурса в этот узел. Таким образом, анализ участков и дуг по цвету позволяет найти конкретного “виновника” недопоставки энергоресурса, который может находиться достаточно далеко от энергодефицитного узла. Это связано с тем, что трубопроводные сети для транспорта углеводородного сырья в связи с многократной замкнутостью имеют достаточно сложную конфигурацию. В случае с ЕСН наличие дискретного транспорта (железнодорожные, автомобильные перевозки) и возможность учета его в наших моделях позволяют в вычислительном эксперименте более свободно маневрировать потоками нефти и нефтепродуктов, поскольку в этом случае пропускная способность участка не ограничена диаметром трубы. Пользователь данной программы имеет возможность:

- масштабировать изображения графа (увеличить, уменьшить);
- получать информацию о дуге или объекте;
- переключаться в один из режимов просмотра: до расчета (из базы данных) или после расчета (из файла результатов);
- просматривать файл результатов расчета, не покидая программу;
- выбирать из списка один или несколько трубопроводов.

Программа разработана так, что возможно расширение ее услуг в области аналогичных исследований в системах углеснабжения, электроэнергетики.

Таким образом, база данных и интерфейс позволяют:

- получать полную и наглядную информацию о совокупной работе всех систем топливоснабжения и их возможностях по удовлетворению потребителей в исследуемых условиях функционирования;

— оказывать реальную помощь в определении узких мест в системе топливоснабжения в различных ситуациях;

— проводить вычислительный эксперимент при совместной работе отдельных энергетических систем.

Это дает возможность проводить менее трудоемкий, а главное, более качественный и эффективный анализ ситуации и осуществлять выбор соответствующих действий или мероприятий по снижению негативных последствий от возможных недопоставок энерго-ресурса.

Список литературы

- [1] ДЕЙТ К. Дж. *Введение в системы баз данных*. Диалектика, Киев, 1998.
- [2] АНТОНОВ Г. Н., ЧЕРКЕСОВ Г. Н., КРИВОРУЦКИЙ Л. Д. и др. *Методы и модели исследования живучести систем энергетики*. Наука, Сиб. отд-ние, Новосибирск, 1990.
- [3] СУХАРЕВ М. Г., СТАВРОВСКИЙ Е. Р., БРЯНСКИХ В. Е. *Оптимальное развитие систем газоснабжения*. Недра, М., 1981.
- [4] ФОРД Л., ФОЛКЕРСОН Д. *Потоки в сетях*. Мир, М., 1966.

*Поступила в редакцию 5 ноября 1998 г.,
в переработанном виде 31 марта 1999 г.*