

УДК [004.94+519.6]:[656.56+628.14]

Программно-вычислительный комплекс «ИСИГР» для применения методов теории гидравлических цепей в сети Интернет

Н.Н. НОВИЦКИЙ¹, Е.А. МИХАЙЛОВСКИЙ²

¹ 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией. E-mail: ripenet@isem.irk.ru

² 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), младший научный сотрудник. E-mail: egor.isem@mail.ru

В статье дается характеристика информационно-вычислительной технологии для удаленного применения современных методов теории гидравлических цепей при моделировании режимов многоконтурных трубопроводных систем водо- и газоснабжения с использованием стандартного интернет-браузера. Излагаются цели, задача и методы расчета потоко-распределения в гидравлических цепях, а также принципы реализации данной технологии. Предлагаемый объектно-ориентированный подход к моделированию трубопроводных систем опирается на объектно-ориентированный стиль программирования, который предполагает наличие у объекта внутренних свойств и методов. Особенность этого подхода состоит в принципе отделения объектов, имеющих общее значение, от объектов, связанных со спецификой объекта моделирования. Это позволяет многократно применять однажды реализованные общие методы в разных программно-вычислительных комплексах, развивать расчетные компоненты без их перепрограммирования, что в итоге повышает оперативность внедрения этих методов для разных типов трубопроводных систем, классов решаемых задач и сфер применения. Предлагаемая технология реализована в виде распределенного программного комплекса, имеющего клиент-серверную архитектуру, что дает возможность разработчикам своевременно обновлять компоненты на сервере и предоставлять пользователям актуальную версию программы без ее переустановки на рабочих местах. Принципы реализации комплекса обеспечивают выполнение расчетов в любое время, в любом месте и любому числу пользователей при наличии подключения к глобальной сети Интернет. Приложение потенциально применимо в разных отраслях (энергетика, жилищно-коммунальное хозяйство, строительство и др.) и сферах деятельности (проектирование, эксплуатация, диспетчерское управление, исследования и обучение) разного уровня пользователями (инженерами, аспирантами, студентами и т. д.). Приводятся результаты исследований его вычислительной эффективности.

* Статья получена 07 июля 2016 г.

Ключевые слова: гидравлическая цепь, трубопроводная система, потокораспределение, математическое и компьютерное моделирование, программный комплекс, интернет-вычисления, водоснабжение, газоснабжение

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-30-43

ВВЕДЕНИЕ

Значительный потенциал энергосбережения и повышения эффективности трубопроводных систем (ТПС) лежит на пути грамотной организации режимов их работы. Это, в свою очередь, требует использования современных методов математического и компьютерного моделирования для расчета, анализа и количественного обоснования режимов.

К настоящему времени во многих организациях России (ИСЭМ СО РАН, ООО «Политерм» [1], ЗАО «Поток» [2] и др.) и за рубежом (Intergraph Corporation [3], Sunrise Systems Ltd [4], Bentley Systems Incorporated [5] и др.) разработано, продолжает развиваться и внедряться множество конечных программно-вычислительных комплексов (ПВК). Однако, они предназначены для решения конкретного класса задач моделирования (анализа, синтеза, управления) в конкретной области (в проектировании, эксплуатации, диспетчеризации) и применительно к конкретным типам ТПС (тепло-, водо-, газоснабжения и др.).

В ИСЭМ СО РАН на базе развиваемого здесь научного направления – теории гидравлических цепей (ТГЦ) [6, 7 и др.] – разработан уникальный арсенал эффективных методов математического моделирования, расчета и оптимизации, которые потенциально применимы для ТПС произвольного типа и назначения. В связи с этим наблюдается очевидное противоречие между потенциальной общностью этих методов и непроизводительным дублированием работ по их программной реализации и адаптации к прикладной специфике применения.

Объект исследований – информационно-вычислительная технология, обеспечивающая возможность решения задач потокораспределения в ТПС различных типов на основе применения общих методов расчета. Цель исследования – разработка принципов, реализация и апробация такой технологии.

Для достижения этой цели ставились следующие задачи: 1) реализация методов расчета установившегося изотермического потокораспределения в ТПС, независимых от специфики законов течения потоков жидкости (газа) по ее отдельным элементам; 2) систематизация законов течения и разработка принципов реализации моделей, отвечающих за специфику этих законов и взаимодействие с методами расчета потокораспределения ТПС в целом; 3) разработка архитектуры ПВК, обеспечивающего необходимые информационные, вычислительные и аналитические функции в рамках единого интерфейса пользователя применительно к ТПС разных типов; 4) реализация и апробация такого ПВК с ориентацией на его применение в глобальной сети Интернет.

Для решения перечисленных проблем и задач предлагаются следующие взаимосвязанные пути [8, 9]: 1) переход на концепцию объектно-ориентированного моделирования ТПС с целью отделения программных компонент, реализующих общие методы расчета, от компонент, отвечающих за спецификацию ТПС или решаемой задачи; 2) развитие методов ТГЦ с ориентацией на эту

концепцию; 3) организация конечных ПВК по клиент-серверной технологии, обеспечивающей независимость разработки, развития и применения отдельных компонент приложения без перепрограммирования остальных.

Это позволит 1) многократно применять однажды реализованные общие методы в разных ПВК, целях, сферах применения и для разных типов ТПС; 2) применять эти методы удаленно в локальных или глобальных компьютерных сетях; 3) минимизировать затраты на сопровождение и развитие ПВК; 4) повысить оперативность внедрения наиболее совершенных, новых и эффективных методов для традиционных или новых задач моделирования ТПС.

1. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТПС

Традиционная модель установившегося изотермического потокораспределения в ТПС включает два закона Кирхгофа и замыкающие соотношения (законы течения): $Ax = Q$, $\bar{A}^T \bar{P} = y$, $y = f(x)$, где \bar{A} – $(m \times n)$ – матрица инцидентностей узлов и ветвей расчетной схемы с элементами $a_{ji} = 1(-1)$, если узел j является начальным (конечным) для ветви i , и $a_{ji} = 0$, если ветвь i не инцидентна узлу j ; A – $[(m-1) \times n]$ – матрица инцидентностей, образованная из \bar{A} вычеркиванием одной из строк; x , y – n -мерные векторы расходов и перепадов давления на ветвях расчетной схемы; $f(x)$ – n -мерная вектор-функция с элементами $f_i(x_i)$, $i = \overline{1, n}$, отражающими законы падения давления от расхода (законы течения) на ветвях расчетной схемы; Q – $(m-1)$ -мерный вектор узловых расходов с элементами $Q_j > 0$ для притока в узел j , $Q_j < 0$ для отбора в узле j и $Q_j = 0$, если узел j – простая точка соединения ветвей; \bar{P} – m -мерный вектор узловых давлений.

Задача состоит в определении векторов x , y и $(m-1)$ -мерного вектора узловых давлений P при заданных матрице \bar{A} , векторе Q , известном виде $f_i(x_i)$ для $i = \overline{1, n}$ и заданном давлении в одном из узлов (P_m).

Известны многочисленные методы и алгоритмы решения данной задачи, однако, как показано в монографии [6], базовыми являются два метода: контурных расходов и узловых давлений. Оба основаны на методе Ньютона, но с предварительным понижением порядка линеаризованных систем уравнений.

Так, метод узловых давлений (МД) [6] предполагает поиск решения в пространстве узловых давлений и сводится к организации процесса $P^{k+1} = P^k + \Delta P^k$, на каждой k -й итерации которого поправка ΔP^k отыскивается из решения системы $A(f'_x)^{-1} \cdot A^T \Delta P^k = -u_1^k$, где $u_1^k = Ax^k - Q$; $x^k = \psi(y^k)$; $y^k = \bar{A}^T \bar{P}^k$; f'_x – диагональная матрица частных производных $\partial f_i / \partial x_i$ в точке x^k , $i = \overline{1, n}$; ψ – вектор-функция, обратная к f с элементами $\psi_i(y_i)$, $i = \overline{1, n}$.

Отсюда видно, что вычислительная схема МД не зависит от вида функций $f_i(x_i)$, к которым предъявляются только требования монотонного воз-

растания для обеспечения единственности решения задачи [6]. Однако особенности реализации МД связаны со спецификой вида $f_i(x_i)$ и, соответственно, $\partial f_i / \partial x_i$ и $\psi_i(y_i)$.

2. МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ

Для иллюстрации причин разнообразия реализаций МД рассмотрим известную формулу Дарси–Вейсбаха [10] для потери напора в трубопроводе

$$h = \lambda(V) \frac{l V^2}{d 2g},$$

где d, l – диаметр и длина трубопровода, м;
 g – ускорение свободного падения м/с²;
 $V = V(x)$ – скорость течения жидкости, м/с;
 x – массовый расход, кг/с.

Здесь коэффициент гидравлического сопротивления λ зависит от числа Рейнольдса $Re(V) = Vd / \nu$, где ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с, жидкости, который для изотермического течения полагается константой.

Для вычисления λ , в свою очередь, имеется множество формул, отражающих назначение трубопровода, его тип, материал внутреннего покрытия, срок службы, режим течения среды (ламинарный, переходный, турбулентный) и т. п. В качестве примера в табл. 1 приведены некоторые распространенные в России и за рубежом формулы для коэффициента λ и его производных по скорости, где k_e – коэффициент эквивалентной шероховатости, м; A_0, A_1, C, m – коэффициенты, зависящие от материала трубы и режима течения.

Таблица 1

Формулы и производные для коэффициента гидравлического сопротивления

Наименование формулы	λ	λ'_V
Шифринсона [11]	$0,11 \left(\frac{k_e}{d} \right)^{0,25}$	0
Прандтля–Никурадзе [12, 13]	$\left(1,14 + 21g \frac{d}{k_e} \right)^{-2}$	0
Кольбрука–Уатта [10]	$\left[-21g \left(\frac{k_e}{3,7d} + \frac{2,51}{Re(V)\sqrt{\lambda}} \right) \right]^{-2}$	$-\frac{10,04\lambda}{V \left[\left(\frac{k_e V}{3,7\nu} + \frac{2,51}{\sqrt{\lambda}} \right) \ln(10) + 5,02 \right]}$
Альтшуля [10, 12]	$0,11 \left(\frac{k_e}{d} + \frac{68}{Re(V)} \right)^{0,25}$	$-1,87 \left(\frac{k_e}{d} + \frac{68\nu}{ V d} \right)^{-0,75} \frac{\nu}{d V V}$
Шевелева [14]	$A_1 \left(\frac{A_0}{d} + \frac{C}{Vd} \right)^m$	$-\frac{A_1 m C}{(A_0 V + C)^{1-m} d^m V^{1+m}}$

Потеря напора на местных сопротивлениях определяется по формуле Вейсбаха [10]: $h = \zeta V^2 / 2g$, где в случае регулирующих элементов для определения коэффициента местного сопротивления ζ могут потребоваться аппроксимирующие зависимости. Например, для задвижки приемлема зависимость $\zeta = a(1-r)^{-C} - b$, где r – степень прикрытия задвижки; a, b, c – коэффициенты, полученные путем аппроксимации (в том числе «кусочной») таблично заданной характеристики.

Обобщая случаи наличия местных сопротивлений (включая регулируемые) на трубопроводе произвольного типа, для i -й пассивной ветви расчетной схемы можно записать, что $f_i(x_i) = s_i(x_i) |x_i|$, где $s_i(x_i) = \left(\lambda_i(x_i) + \zeta_i^\Sigma \frac{d_i}{l_i} \right) \frac{8l_i}{\rho \pi^2 d_i^5}$ – сопротивление ветви, так как $V_i = 4x_i / (\pi d_i^2 \rho)$, $y_i = \rho g h_i$; ρ – плотность транспортируемой среды, кг/м³; ζ_i^Σ – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

$$\text{При этом [9] } f'_{x,i} = \frac{df_i}{dx_i} = (2s_i + s'_{x,i} x_i) |x_i|, \text{ где } s'_{x,i} = \frac{ds_i}{dx_i} = \frac{32l_i}{\rho^2 \pi^3 d_i^7} \lambda'_{V,i}.$$

Таким образом, получение $f'_{x,i}$ для трубопровода произвольного типа и назначения требует лишь конкретизации $\lambda'_{V,i}$ (см. табл. 1).

В случае $\lambda'_{V,i} = \text{const}$ вычисление расхода x_i^k по заданному перепаду давлений y_i^k сводится к применению формулы $x_i^{t+1} = \sqrt{\frac{|y_i^k|}{s}} \text{sign}(y_i^k)$. В общем случае неявной функции $\psi_i(y_i)$ вычисление x_i^k может быть выполнено итерационно, например, с помощью метода простой итерации, когда $x_i^{t+1} = \sqrt{\frac{|y_i^k|}{s(x_i^t)}} \text{sign}(y_i^k)$, или методом Ньютона, согласно которому $x_i^{t+1} = x_i^t + \frac{y_i^k - f_i(x_i^t)}{(f'_{x,i})^t}$, где k – индекс итерации расчета потокораспределения,

t – индекс итерации отыскания x_i^k , $x_i^0 = x_i^{k-1}$.

Таким образом, особенности реализации МД целиком связаны со спецификой моделей течения по элементам ТПС (включая трубопроводы, насосы, задвижки и т. д.), проявляющейся на этапах расчета f'_k и x^k .

3. ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Предлагаемый объектно-ориентированный подход к моделированию ТПС опирается на объектно-ориентированный стиль программирования, который предполагает наличие у объекта внутренних свойств и методов. Особенность этого подхода состоит в принципе выделения объектов, который обеспечивает отделение объектов, имеющих общее значение от объектов, связанных со спецификой конкретного случая.

Введем два самостоятельных объекта – «Модель сети» и «Модели элементов». Первый в роли внутренних свойств располагает информацией о топологии расчетной схемы и значениях граничных условий (потребление или давление среды в узлах), а в качестве внутренних методов выступают общие методы расчета потокораспределения, например, МД. Второй имеет внутренними свойствами параметры моделируемых элементов в соответствии с их типами (например, длина, диаметр, материал трубопровода, коэффициенты аппроксимирующих зависимостей характеристик насосов и т. д.), а внутренние методы обеспечивают вычисление параметров $f_i(x_i)$, $\psi_i(y_i)$ и $\partial f_i / \partial x_i$ по конкретному i -му элементу ТПС.

Расчет потокораспределения будет сводиться к многократному обращению объекта «Модель сети» к требуемым свойствам объекта «Модели элементов». При этом метод расчета потокораспределения не связан с особенностями моделирования элементов, что дает возможность компоновать ПВК с привлечением готовых и расширяемых объектов «Модель сети» и «Модели элементов» при соблюдении правил, обеспечивающих их взаимодействие.

На сегодняшний день существует множество информационных технологий для реализации таких объектов, а также операционных систем (ОС), которые накладывают свои ограничения. Исходя из того, что наиболее распространенной ОС является Windows, а реализуемые компоненты не должны зависеть от языка программирования, в роли базовой была выбрана технология COM [8].

4. ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПВК «ИСИГР»

ПВК «ИСИГР» (Интернет-система гидравлических расчетов)¹ [15] представляет собой конечную реализацию изложенных подходов и предназначен для моделирования режимов многоконтурных трубопроводных систем водо- и газоснабжения в сети Интернет путем удаленного применения современных методов теории гидравлических цепей. Соответственно, он обеспечивает возможность выполнять расчеты в любое время, в любом месте и любому числу пользователей при наличии подключения к Интернету и стандартного веб-обозревателя. Он может быть полезен проектным и эксплуатационным организациям, научным и исследовательским учреждениям, инженерам, аспирантам и студентам. ПВК имеет интуитивно понятный интерфейс пользователя, малую вложенность редактируемых форм и собственные механизмы создания и редактирования схемы сети и данных, что существенно сокращает время на обучение и применение.

ПВК основан на клиент-серверной архитектуре и состоит из интерфейса, веб-сервера, блока контроля, библиотеки расчетных модулей (БРМ) и базы данных типового оборудо-

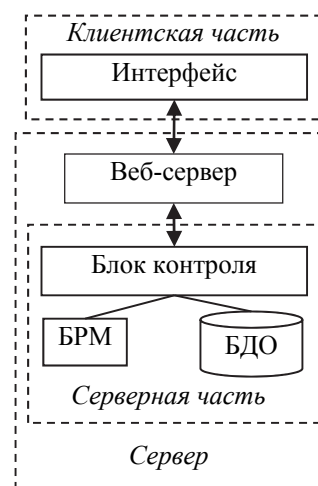


Рис. 1. Составные части ПВК

¹ <http://51.isem.irk.ru>

вания (БДО) (рис. 1). Данная архитектура подразумевает наличие у программы двух частей – клиентской и серверной, которые должны находиться на разных компьютерах и взаимодействовать друг с другом по сети. Для взаимодействия этих частей в глобальной сети применяется специальная программа – веб-сервер, находящаяся вместе со всеми компонентами ПВК на удаленном компьютере разработчика – сервере. При удаленном обращении пользователя к этому компьютеру веб-сервер автоматически предоставляет клиентскую часть. Такой подход не требует от пользователей наличия высокопроизводительных компьютеров, установки и обновления ПВК на рабочем месте, поскольку вычислительная часть находится на сервере.

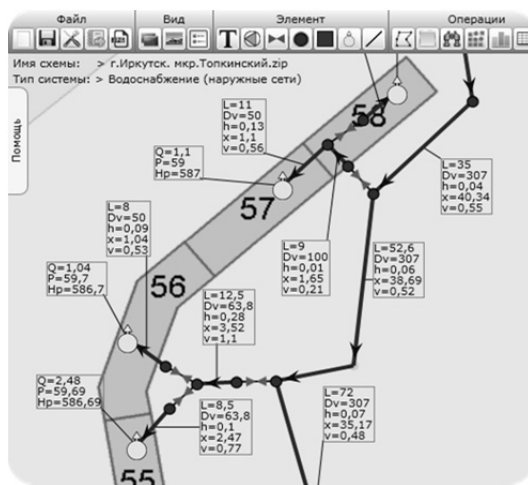


Рис. 2. Иллюстрация примера схемы

(связей между узлами), имеющих соответствующие условные обозначения. Узлы в «ИСИГР» могут быть трех типов: соединительный, потребитель, источник. Ветви: участок, запорная арматура, насосный агрегат. Механизм работы над схемами аналогичен современным программам, позволяющим редактировать блок-схемы, состоящие из графических объектов. Так, например, применяется способ, когда конец связи при перемещении «прилипает» к ближайшему узлу в некотором радиусе, что ускоряет сборку схемы. Или врезка узла в существующую связь, когда новый узел также «прилипает» к линии связи в процессе его добавления на схему.

2. Применение графических карт, космоснимков и других изображений местности для привязки схем.

3. Сохранение и загрузка расчетных схем реализована без привлечения сетевых баз данных, что позволяет пользователям хранить данные на личном компьютере.

4. Внесение параметров по элементам схем осуществляется в табличном виде с применением «умных полей», которые предоставляют пользователю выбор параметров элемента из перечня БДО.

5. Отправка исходных данных схем на сервер для расчета и прием результатов расчета, а в случае наличия ошибок в исходных данных – результатов проверки.

Клиентская часть отвечает за пользовательский графический интерфейс (рис. 2), использующий стандартный веб-обозреватель (Web-Browser) ОС Windows. Интерфейс реализован с использованием Microsoft Silverlight [16] – специального программного компонента, предназначенного для создания программ, работающих в среде веб-обозревателя.

Этот интерфейс обеспечивает следующие возможности.

1. Создание и редактирование расчетных схем, которые компонуются из узлов и ветвей

6. Отображение и интерпретация результатов расчета вместе с исходными данными осуществляется следующими способами:

- графический – на выносках к элементам схемы (рис. 2);
- табличный – в индивидуальном окне свойств элементов;
- цветовой – назначение цвета для связей относительно заданного критерия, например, по диаметру или потере напора по длине, что дает эффект цветового градиента на схеме;
- анимационный – позволяет акцентированно обозначить элементы схемы, требующие внимания пользователя, подвижными графическими фрагментами;
- символьный – позволяет заменять или дополнять изображение элемента относительно его параметра; например, цвет и форма изображения запорной арматуры зависят от степени ее прикрытия.

Присутствует возможность построения пьезометрического графика по заданному пути как вручную, по однозначно указанным ключевым узлам сети, так и автоматически, когда применяются методы поиска кратчайшего пути.

Серверная часть ПВК выполняет расчет и анализ исходных данных для клиентской части, а также обеспечивает доступ к БДО. Так, поступившие на расчет данные через веб-сервер передаются блоку контроля, который осуществляет преобразование данных во внутренний формат, проверку корректности данных и обращение к компонентам расчета (БРМ). После чего ожидает результат расчета и возвращает его клиентской части в обратном порядке через веб-сервер с соответствующими преобразованиями.

Библиотека расчетных модулей в «ИСИГР» содержит реализации нескольких методов решения задачи потокораспределения, выступающих в качестве внутренних методов «Модели сети»: МД [9], МКР – метод контурных расходов [17], МДХ – метод узловых давлений хордовый [18], МПИ – метод простой итерации [19–21]. Процесс работы БРМ и этапы получения решения следующие (рис. 3):

перед каждым расчетом в память компьютера загружаются компоненты объектов «Модель сети» и «Модели элементов», параметризуются их свойства, увязываются между собой посредством программных указателей, после чего выполняется расчет с выводом результата.

Структура объекта «Модели элементов» обеспечивает его расширение на новые типы элементов без перепрограммирования компонента, реализующего этот объект. Для этого достаточно создать новый объект и соблюсти те же правила взаимодействия с объектом «Модель сети». И если в процессе параметризации базового объекта «Модели элементов» найдется элемент, который не покрывается этим объектом, но соответствует новому объекту, то

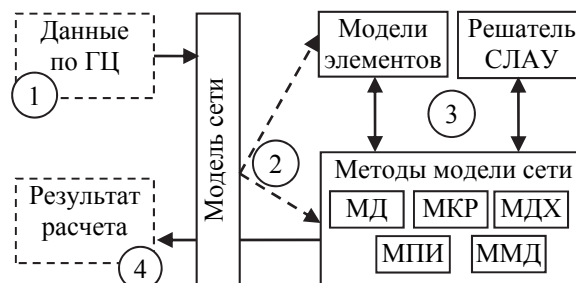


Рис. 3. Принципиальная схема работы БРМ (цифры – номер этапа, сплошные стрелки указывают направление передачи параметров при взаимодействии, пунктирные стрелки – параметризация)

он будет учтен базовым. Как результат, в процессе расчета запрос на вычисление параметра нового типа элемента будет переправлен новому объекту посредством базового объекта. С точки зрения объекта «Модель сети» оба объекта, базовый и новый, будут полиморфны и выглядеть как один объект, что позволит неограниченно развивать объект «Модели элементов». Более того, новые объекты могут быть реализованы в отдельных компонентах, на различных языках программирования, и их параметризация может отличаться от базового объекта «Модели элементов».

В каждом методе расчета потокораспределения необходимо решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). В «ИСИГР» реализовано два метода: Гаусса–Жордана и Холецкого, причем последний с применением технологии разреженных матриц, что в большинстве случаев сокращает общее время счета в среднем на два порядка [22, 23]. Для исключения дублирования алгоритмы решения СЛАУ вынесены в отдельный компонент.

Для расчета потерь давления на участке трубопровода системы водоснабжения также может применяться формула Хазена–Вильямса (Hazen-Williams) [24]: $V = 0,849CR^{0,63} \cdot i^{0,54} \cdot l$, где $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ – коэффициент Шези; $R = d/4$ – гидравлический радиус, м; $i = h/l$ – гидравлический уклон, м вод. ст.

Потеря давления в запорной арматуре вычисляется по формуле Дарси, а напор насосного агрегата – по многочлену, который аппроксимирует его напорную характеристику. Расчет перепада давления в трубопроводе системы газоснабжения выполняется по формулам для низкого, среднего и высокого давления [25]. В последнем случае значение давления в методе расчета принимается равным квадрату давления. При этом расчет выполняется без активных элементов, например, компрессора.

Компоненты ПВК реализованы на языке C# при использовании средств .Net Framework различных версий.

База данных оборудования предназначена для параметризации элементов расчетных схем через интерфейс ПВК. В ней содержится описание сортов труб (около 6000 позиций из 19 ГОСТов) и набор коэффициентов аппроксимирующих зависимостей для таблично заданных характеристик запорной арматуры и насосов (рис. 4).

5. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Ниже приведены таблицы с результатами вычислительных экспериментов, проведенных с помощью разных методов расчета потокораспределения, сравниваемых по количеству итераций и времени счета (табл. 2) для сгенерированных случайным образом схем водопроводных сетей, сопоставимых по числу потребителей населенным пунктам с числом жителей до 15–20 тыс. чел.

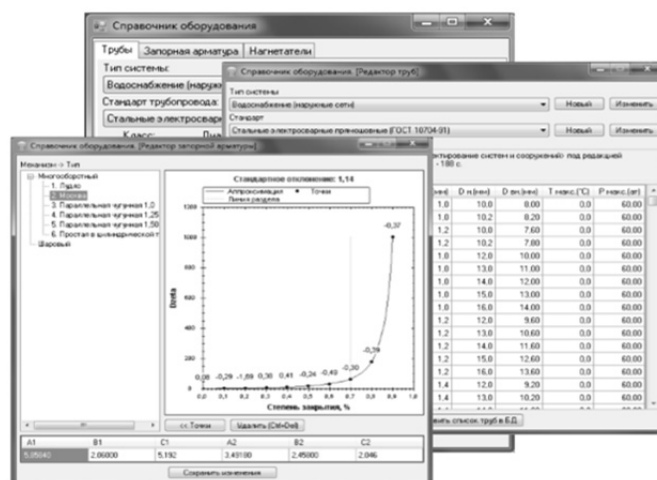


Рис. 4. Интерфейс редактора БДО

Условия расчета: в состав схем входят узлы (доля потребителей ~30 %, источников ~5 %) и ветви (насосов ~5 %, остальные – участки трубопровода). Параметры участков трубопровода: длина от 100 до 1000 м, внутренний диаметр от 100 до 500 мм, 19 стандартов изготовления труб из различных материалов (стальные, чугунные, асбестоцементные, полиэтиленовые, железобетонные, стеклопластиковые). Конфигурация сети принята плоская, где к каждому узлу примыкают от 2 до 4 ветвей. Заданная точность небаланса в методах расчета взята 0,01 для следующих показателей: для МД – расходов в узлах; для МКР – потерь давления в контурах; для МДХ – расходов и потерь давления на ветвях; для МПИ – максимальной поправки к расходу ветви. Единицы измерения расхода – л/с, давления – м вод. ст. Решение СЛАУ выполняется методом Гаусса–Жордана.

Таблица 2

Число итераций (время) расчета разными методами

Метод	Количество узлов схемы									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	Количество итераций (время, с)									
МД	10(0)	10(1)	9(4)	11(12)	9(21)	11(52)	12(83)	14(142)	12(155)	12(212)
МКР	10(0)	9(1)	11(5)	12(15)	13(38)	15(79)	12(105)	15(194)	11(216)	14(359)
МДХ	6(0)	6(1)	6(3)	8(9)	7(19)	7(27)	9(68)	6(90)	8(103)	7(123)
МПИ	14(0)	15(2)	17(9)	18(22)	17(42)	17(65)	16(101)	19(190)	17(244)	18(345)

Видно, что с ростом размерности схемы резко растет время счета. Однако, несмотря на то что МДХ показал лучшие результаты, остальные методы также применимы для расчета режима ТПС размерностью до 500 узлов расчетной схемы.

Далее приведен результат расчета для принятых условий и схем, где решение СЛАУ выполняется методом Холецкого (МКР не рассмотрен) (табл. 3).

Таблица 3

Время расчета разными методами с учетом разреженности СЛАУ

Метод	Количество узлов схемы									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	Время счета, с									
МД	0	0	0	0	1	1	2	3	4	4
МДХ	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2
МПИ	0	0	0	0	1	1	2	3	4	5

Как видно из табл. 3, решение СЛАУ с применением технологии разреженных матриц существенно ускоряется процесс счета, что особенно критично при моделировании ТПС в сети Интернет, где ожидание пользователей должно быть минимальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Раскрыта актуальность объектно-ориентированного подхода к реализации методов математического моделирования ТПС, обеспечивающего возможность многократного применения единожды реализованных общих методов расчета в разных ПВК, разрабатываемых в разных целях, сферах применения и для ТПС различного типа и назначения.

Изложены принципы клиент-серверной архитектуры реализации таких ПВК, позволяющей создавать как локализованные, так и распределенные приложения.

Дана характеристика реализованного на этих принципах ПВК «ИСИГР», представляющего собой инновационную разработку, впервые обеспечивающую возможность дистанционного применения эффективных методов теории гидравлических цепей для моделирования гидравлических режимов ТПС водо- и газоснабжения в сети Интернет, а также снабженную всеми необходимыми функциями, облегчающими процессы задания информации и интерпретации результатов расчетов.

Приведены результаты вычислительных экспериментов, показывающие высокую эффективность разработанной технологии в отношении быстродействия расчетов ТПС значительной размерности, исчисляемой многими сотнями узлов расчетной схемы.

В настоящее время ПВК «ИСИГР» проходит практическую апробацию и находится в открытом доступе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Политерм [Электронный ресурс]: web-сайт. – URL: <http://www.politerm.com> (дата обращения: 08.09.2016).
2. Поток: программы для расчета систем отопления, холодоснабжения, вентиляции [Электронный ресурс]: web-сайт. – URL: <http://www.potok.ru> (дата обращения: 08.09.2016).
3. Intergraph [Electronic resource]: website. – URL: <http://www.intergraph.com> (accessed: 09.09.2016).

4. Sunrise Systems company [Electronic resource]: website. – URL: <http://www.sunrise-sys.com> (accessed: 09.09.2016).
5. Bentley [Electronic resource]: website. – URL: <http://www.bentley.com> (accessed: 09.09.2016).
6. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
7. Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения / Н.Н. Новицкий и др.; отв. ред. А.З. Гамм. – Новосибирск: Наука, 2000. – 273 с.
8. Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Объектно-ориентированное моделирование гидравлических цепей // Вестник ИРГТУ. – 2012. – № 7. – С. 170–176.
9. Mikhailovsky E.M., Novitsky N.N. A modified nodal pressure method for calculating flow distribution in hydraulic circuits for the case of unconventional closing relations // St. Petersburg Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2015. – Vol. 1, iss. 2. – P. 120–128.
10. Альтиуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
11. Шифринсон Б.Л. Основной расчет тепловых сетей: теория и методы расчета. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1940. – 188 с.
12. СНиП 2.04.07–86*. Тепловые сети. – М.: Госстрой России, 1994. – 56 с.
13. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж, А.И. Манюк, В.К. Ильин. – 3-е изд. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.
14. СНиП 2.04.02–84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Изд. М-ва регион. развития Рос. Федерации, 2012. – 157 с.
15. Программно-вычислительный комплекс «ИСИГР» 1.0: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013619400 / Н.Н. Новицкий, Е.А. Михайловский; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской Академии наук. – Зарег. 03.10.2013. – 1 с.
16. Байдачный С.С. SilverLight 4: создание насыщенных Web-приложений. – М.: СОЛОН-Пресс, 2010. – 288 с.
17. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / под общ. ред. В.Я. Хасилева и А.П. Меренкова. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
18. Новицкий Н.Н. Расчет потокораспределения в гидравлических цепях на базе их линеаризации узловыми моделями секущих и хорд // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 6. – С. 56–69.
19. Баранчикова Н.И., Епифанов С.П., Зоркальцев В.И. Неканоническая задача потокораспределения с заданными напорами и отборами в узлах // Вода и экология: проблемы и решения. – 2014. – № 2. – С. 31–38.
20. Фейзуллин Р.Т. О решении нелинейных алгебраических систем гидравлики // Сибирский журнал индустриальной математики. – 1999. – Т. 2, № 2. – С. 176–184.
21. Krope J., Doberšek D., Goričanec D. Flow pressure analysis of pipe networks with linear theory method // WSEAS/IASME International Conference on Fluid Mechanics, Miami, FL, 18–20 January 2006. – Miami, 2006. – P. 59–62.
22. Numerical recipes in C: the art of scientific computing / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. – 925 p.
23. Луссанецки С. Технология разреженных матриц: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 410 с.
24. Williams G.S., Hazen A. Hydraulic tables. – New York: John Wiley and Sons, 1905. – 63 p.
25. СНиП 2.04.08–87*. Газоснабжение. – М.: Госстрой России, 1995. – 91 с.

Новицкий Николай Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией трубопроводных и гидравлических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основное направление научных исследований – моделирование трубопроводных систем. Имеет 60 публикаций. E-mail: ripenet@isem.irk.ru

Михайловский Егор Анатольевич, младший научный сотрудник лаборатории трубопроводных и гидравлических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основное направление научных исследований – моделирование трубопроводных систем. Имеет 18 публикаций. E-mail: egor.isem@mail.ru

The Internet System of Hydraulic Calculation software for the application of the hydraulic circuit theory methods on the Internet*

N.N. NOVITSKY¹, E.A. MIKHAILOVSKY²

¹ Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS), 130, Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), chief researcher, head of the laboratory of pipeline and hydraulic systems. E-mail: pipenet@isem.irk.ru

² Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS), 130, Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation, junior researcher, laboratory of pipeline and hydraulic systems. E-mail: egor.isem@mail.ru

The paper characterizes an information-computation technology for a remote application of modern methods of the hydraulic circuit theory in modeling multi-loop pipeline water and gas supply systems using a standard Internet browser. The goals, problems and calculation methods of flow distribution in hydraulic circuits as well as the principles of this technology implementation are presented. The suggested object-oriented approach to modeling pipeline systems rests on the object-oriented programming style. This style implies that an object has internal properties and methods. A distinctive feature of this approach lies in the principle of separating the objects with a common value from the objects related to the specificity of an object to be modeled. This allows a multiple application of once implemented common methods in different software packages, the development of calculation components without their reprogramming, which eventually accelerates the adoption of these methods for different types of pipeline systems, classes of problems to be solved and application areas. The proposed technology is implemented as a distributed software package that has client-server architecture. This enables developers to timely update the components on the server and provide users with an up-to-date program version without the program reinstallation at workplaces. The principles of the software implementation make it possible to perform calculations anytime, anywhere and for any number of users, provided there is a connection to the global net, the Internet. This application can be used in various areas (energy sector, housing and public utilities, building sector, etc.), activities (design, operation, dispatching control, research and education), and by users of various levels (engineers, postgraduates, students, etc.). The results of the studies of its computational efficiency are presented.

Keywords: Hydraulic circuit, pipeline system, flow distribution, mathematical and computer simulation, software, Internet-calculation, water supply, gas supply

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-30-43

REFERENCES

1. *Politerm*: website. (In Russian) Available at: <http://www.politerm.com> (accessed 08.09.2016)
2. *Potok: programmy dlya rascheta sistem otopleniya, kholodosnabzheniya, ventilyatsii* [Potok: fast and qualitative calculation of systems of heating, coolings, ventilation]: website. Available at: <http://www.potok.ru> (accessed 08.09.2016)
3. *Intergraph*: website. Available at: <http://www.intergraph.com> (accessed 09.09.2016)
4. *Sunrise Systems company*: website. Available at: <http://www.sunrise-sys.com> (accessed 09.09.2016)
5. *Bentley*: website. Available at: <http://www.bentley.com> (accessed 09.09.2016)
6. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskih tsepei* [The hydraulic circuit theory]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 278 p.
7. Novitskii N.N. et. al., Gamm A.Z., ed. *Gidravlicheskie tsepi. Razvitie teorii i prilozheniya* [The hydraulic circuits. Development of the theory and application]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 273 p.

* Received 07 July 2016.

8. Novitskii N.N., Mikhailovskii E.A. Ob"ektno-orientirovannoe modelirovanie gidravlicheskh tsepei [Object-oriented simulating of hydraulic circuits]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2012, no. 7, pp. 170–176.
9. Mikhailovsky E.M., Novitsky N.N. A modified nodal pressure method for calculating flow distribution in hydraulic circuits for the case of unconventional closing relations. *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2015, vol. 1, iss. 2, pp. 120–128. Translated from *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2015, no. 2, pp. 30–42.
10. Al'tshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulic resistance]. 2nd ed. Moscow, Nedra Publ., 1982. 224 p.
11. Shifrinson B.L. *Osnovnoi raschet teplovykh setei: teoriya i metody rascheta* [Main calculation of thermal networks: theory and methods of calculation]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1940. 188 p.
12. SNiP 2.04.07–86*. *Teplovye seti* [Building regulations 2.04.07–86. Thermal networks]. Moscow, Gosstroii Rossii Publ., 1994. 56 p.
13. Manyuk V.I., Kaplinskii Ya.I., Khizh E.B., Manyuk A.I., Il'in V.K. *Naladka i ekspluatatsiya vodyanykh teplovykh setei* [Adjustment and operation of water thermal networks]. Moscow, Stroizdat Publ., 1988. 432 p.
14. SNiP 2.04.02–84*. *Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya* [Building regulations 2.04.02–84*. Water supply. Pipelines and portable water treatment plants]. Moscow, Ministerstvo regional'nogo razvitiya Publ., 2012. 157 p.
15. Novitskii N.N., Mikhailovskii E.A. *Programmno-vychislitel'nyi kompleks "ISIGR" 1.0* [The software "ISIGR" 1.0]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2013619400, 2013. (In Russian, unpublished)
16. Baidachnyi S.S. *SilverLight 4: sozдание насыщенных Web-приложений* [SilverLight 4: creation of saturated Web applications]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2010. 288 p.
17. Khasilev V.Ya., Merenkov A.P., eds. *Metody i algoritmy rascheta teplovykh setei* [Methods and algorithms of thermal networks calculation]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 176 p.
18. Novitskii N.N. Raschet potokoraspredeleniya v gidravlicheskh tsepyakh na baze ikh linearizatsii uzlovymi modelyami sekushchikh i khord [Calculation of the flow distribution in hydraulic circuits based on their linearization by nodal models of secants and chords]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Thermal Engineering*, 2013, no. 6, pp. 56–69. (In Russian)
19. Baranchikova N.I., Epifanov S.P., Zorkal'tsev V.I. Nekanonicheskaya zadacha potokoraspredeleniya s zadannymi naporami i otborami v uzlakh [Uncanonical problem of flow distribution with the set pressures and selections in nodes]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya – Water and Ecology: problems and solutions*, 2014, no. 2, pp. 31–38.
20. Feizullin R.T. O reshenii nelineinykh algebraicheskikh sistem gidravliki [About the solution of nonlinear algebraic systems of hydraulics]. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki – Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 1999, vol. 2, no. 2, pp. 176–184. (In Russian)
21. Krobe J., Dobersek D., Goricane D. Flow pressure analysis of pipe networks with linear theory method. *WSEAS/LASME International Conference on Fluid Mechanics*, Miami, FL, 18–20 January 2006, pp. 59–62.
22. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1992. 925 p.
23. Pissanetzky S. *Sparse matrix technology*. London, Orlando, Academic Press, 1984. 321 p. (Russ. ed.: Pissanetski S. *Tekhnologiya razrezhennykh matrits*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1988. 410 p.)
24. Williams G.S., Hazen A. *Hydraulic tables*. New York, John Wiley and Sons, 1905. 63 p.
25. SNiP 2.04.08–87*. *Gazosnabzhenie* [Building regulations 2.04.08–87*. Gas supply]. Moscow, Gosstroii Rossii Publ., 1995. 91 p.