



CFD-моделирование гидравлических режимов тепловых сетей

Введение

Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics Modeling, CFD), известная как «трёхмерное гидравлическое моделирование», представляет собой практический способ прогнозирования и визуализации потоков жидкости в реальных условиях. С её помощью мы можем понять, как поведёт себя теплоноситель в системе теплоснабжения.

Основное преимущество использования данного метода CFD-исследования заключается в точности результатов. Мы опишем возможность регулирования пьезометрического графика тепловой сети в программах CFD, а именно регулирование гидростатического давления на байпасе, и на основе полученных данных решим вопрос о разработке нового расчётного метода проектирования тепловых сетей, а также рассмотрим технические недостатки, которые могут встретиться на практике. Цифровые данные, конечно, дают ответы на поставленные вопросы, но для принятия оперативных решений целесообразно воспользоваться преимуществами визуализации расчётов, в частности, CFD-моделированием [1].

Основной раздел

Энергосбережение в теплоснабжении является одним из наиболее актуальных вопросов [2]. Эффективное функциони-

рование систем теплоснабжения во многом зависит от режимов работы тепловой сети [3, 4]. Именно поэтому важно оптимизировать гидравлические режимы в сложных системах. Математическому моделированию перемещения тепловых потоков в трубопроводных системах посвящены работы [5, 6], экспериментальному исследованию — работы [7–9].

Изучение гидравлических режимов работы системы в реальном времени, их влияние на гидравлическую устойчивость тепловой сети наиболее наглядно показано в CFD-моделировании. CFD позволяет смоделировать тепловую сеть для визуализации технических решений, и его главным преимуществом является получение результатов высокой точности, а недостатком — сильная зависимость результатов от качества смоделированной расчётной сетки модели, ведь чем сложнее структура модели, тем больше ресурсов необходимо для расчёта.

Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics Modeling), известная как «трёхмерное гидравлическое моделирование», представляет собой практический способ прогнозирования и визуализации потоков жидкости в реальных условиях

Рецензия эксперта на статью получена 09.12.2020 [Expert review on the article received on December 9, 2020].

УДК 697.34. Номер научной специальности: 05.14.04, 05.14.14.

CFD-моделирование гидравлических режимов тепловых сетей

А. А. Алексеев, аспирант; **А. В. Кнюк**, аспирант; **Ю. Л. Липовка**, д.т.н., Сибирский федеральный университет (СФУ, г. Красноярск)

Для принятия корректных технических решений применительно к управлению гидравлическими режимами сложных трубопроводных систем, каковыми являются сети централизованного теплоснабжения с зависимым присоединением систем отопления зданий, необходимо выполнить достаточно сложные расчёты с использованием компьютерных программ, которые позволяют получить цифровую информацию о потокораспределении теплоносителя (распределении давления теплоносителя в точках разветвления трубопроводов и расходов). В статье рассмотрена работа в расчётной программе CFD-моделирования.

Ключевые слова: тепловая сеть, пьезометрический график, гидростатические режимы, гидродинамические режимы, CFD, математическое моделирование.

UDC 697.34. The number of scientific specialty: 05.14.04, 05.14.14.

CFD modeling of hydraulic modes of thermal networks

A. A. Alekseev, postgraduate student; **A. V. Knyuk**, postgraduate student; **Yu. L. Lipovka**, Doctor of Technical Sciences, Siberian Federal University (SFU, Krasnoyarsk city)

To make correct technical decisions in relation to the control of hydraulic modes of complex pipeline systems, such as district heating networks with dependent connection of heating systems of buildings, it is necessary to perform rather complex calculations using the software that allow you to obtain digital information about the flow distribution of the heat carrier — the distribution of the heat carrier pressure at the points of branching pipelines and flow rates. The article discusses with the calculations in the CFD modeling software.

Key words: thermal network, piezometric graph, hydrostatic modes, hydrodynamic modes, CFD, mathematical modeling.

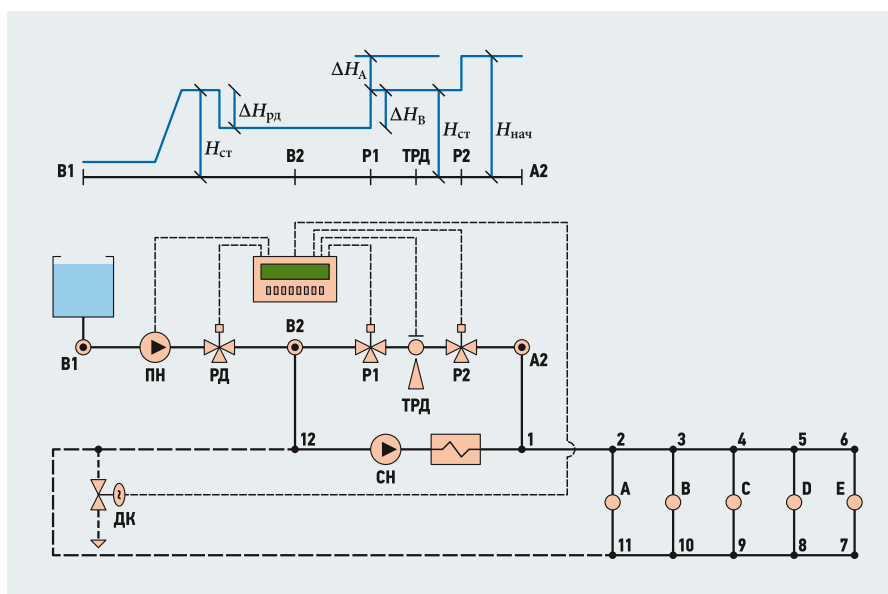


Рис. 1. Принципиальная схема тепловой сети (ПН — подпиточный насос; РД — регулятор давления; ДК — дросселирующий клапан; Р2 — регулирующий вентиль № 2; Р1 — регулирующий вентиль № 1; ТРД — нейтральная точка или точка регулируемого давления; $H_{сн}$ — напор сетевого насоса; СН — сетевой насос; П1 — подающий трубопровод; 7–11 — обратный трубопровод; 1–6 — подающий трубопровод; $H_{ст}$ — статическое давление в сети; $\Delta H_{рд}$ — потери давления на регуляторе давления; ΔH_A — потери давления на регулирующем вентиле p_1 ; ΔH_B — потери давления на регулирующем вентиле № 2; $H_{нач}$ — начальное давление, равное $\Delta H_{ст} + H_{сн}$)

В качестве одного из примеров рассмотрим узел подпитки тепловой сети, представленный на рис. 1.

После выполнения гидравлических расчётов, с учётом особенностей поведения коэффициента гидравлического трения [4] и построения пьезометрического графика, переводим объект исследования в математический вид для расчёта с помощью программы математического моделирования. Для расчёта отключения потребителя смоделируем замкнутую цепь с пятью контурами теплотребления А, В, С, D и Е.

Производим расчёт в программном комплексе SolidWorks. Полученные результаты приведены на рис. 2.

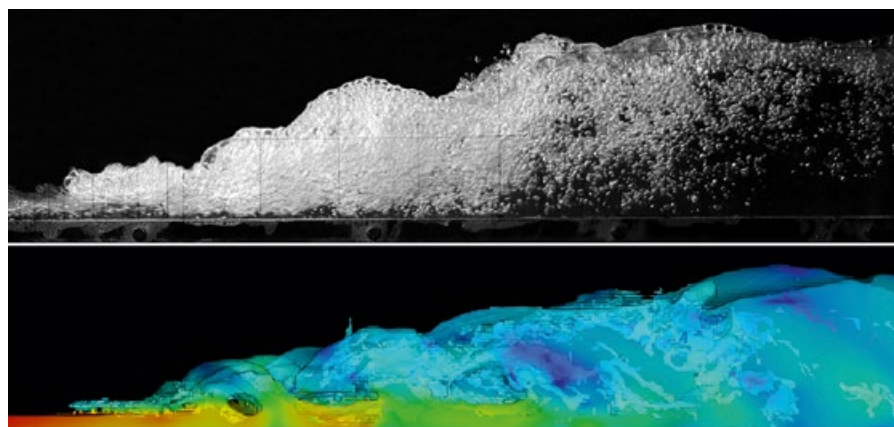


Рис. 2. Абстрактный пример экспериментальной модели и её симулирования методами CFD-моделирования в гидравлике. Представлена модель «гидравлического прыжка» (по Валеро и др.), с входным числом Фруда около 6,0, и её симуляция численными методами (по Байону и др.)

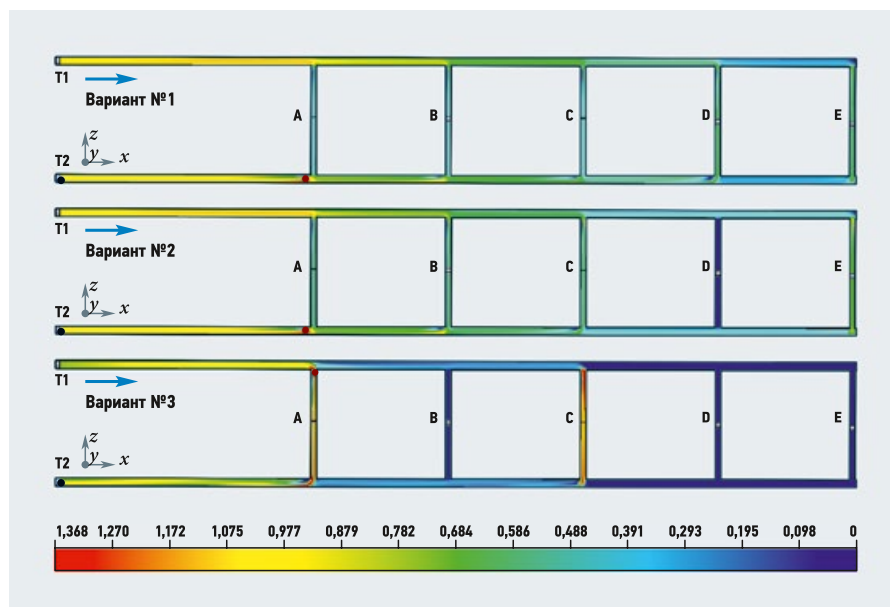


Рис. 2. График скорости теплоносителя в трубопроводе

Вариант 2 указывает на небольшое увеличение скорости на потребителях, а вариант 3 с отключением двух и более потребителей показывает избыток скорости на потребителях А и С. Вместе с ростом скорости растут потери давления, что сказывается на работе сетевого насоса

На нём отображены точечные параметры по длине трубопровода циркуляционных колец, представленных на рис. 1.

Смоделируем отключение одного потребителя (вариант 2) и отключение трёх потребителей (вариант 3). Для варианта 2: в результате расчёта наблюдается отклонение фактического расхода G_f от расчётной величины G_p , что вызывает гидравлическую разрегулировку абонентских систем. Отключение части нагрузки приводит к снижению потерь

давления в сети и к росту располагаемых давлений и расхода воды у оставшихся абонентов.

Вариант 2 указывает на небольшое увеличение скорости на потребителях, а вариант 3 с отключением двух и более потребителей показывает избыток скорости на потребителях А и С. Вместе с ростом скорости растут потери давления.

Изменение скорости теплоносителя при отключении потребителей (варианты 2 и 3) показано на рис. 2.

Поскольку с ростом скорости на потребителях возрастают и потери давления, это сказывается на работе сетевого насоса, поэтому возникает риск избытка давления на конечном потребителе.

Рассмотрим пьезометрический график узла подпитки, пьезометрический график и принципиальную схему байпаса, представленную на рис. 1.



Рис. 3. График скоростей тепловой сети на каждом циркуляционном кольце (а — вариант №1, б — вариант №2, в — вариант №3)

Параметры: $\Delta H_A = 3$ м вод. ст., $\Delta H_B = 21$ м, $H_{CT} = 57$ м, $\Delta H_{PД} = 21$ м и $H_{нач} = 76$ м вод. ст. Принцип действия регулирования описан далее.

Давление в нейтральной точке регулируется регулируемыми вентилями P1 и P2 (рис. 1). То есть, если начать прикрывать или полностью закрыть регулирующий вентиль P1, то давление в нейтральной точке будет стремиться к давлению, равному нагнетанию на сетевом насосе, и пьезометрический график начнёт опускаться параллельно оси Oy до минимального упора, и в системе будет наблюдаться аварийный режим. Если прикрывать регулирующий вентиль P2, то давление в нейтральной точке будет стремиться к давлению на входе сетевого насоса, и пьезометрический график начнёт подниматься вверх параллельно оси Oy .

Далее рассмотрим регулирование гидростатического давления в узле подпитки тепловой сети. Подпиточный насос развивает напор H_{CT} . Напор на байпасной линии в точке регулируемого давления (ТРД) равен H_{CT} . В регулирующем вентиле P1

есть напор ΔH_A , и полный напор после него рассчитывается как $H_{01} = H_{нач} - \Delta H_{P2}$. В задвижке P2 напор $H_{02} = H_{CT} - \Delta H_{P1}$. Регулятор давления поддерживает постоянное давление в точке ТРД между регулируемыми вентилями P1 и P2, при этом в точке после P1 будет поддерживаться напор H_{01} .

Для определения необходимого прикрытия клапана и получения требуемых значений воспользуемся авторской расчётной методикой, реализованной в Excel. Согласно разработанной методике, степень прикрытия составляет 40%. Малый пьезометр после прикрытия клапана с параметрами $\Delta H_A = 19$ м вод. ст., $\Delta H_B = 21$ м, $H_{CT} = 57$ м, $\Delta H_{PД} = 21$ м и $H_{нач} = 76$ м вод. ст. представлен на рис. 3.

Численные эксперименты по визуализации гидравлических режимов работы как элементов, так и всей системы в целом позволяют принимать обоснованные технические решения

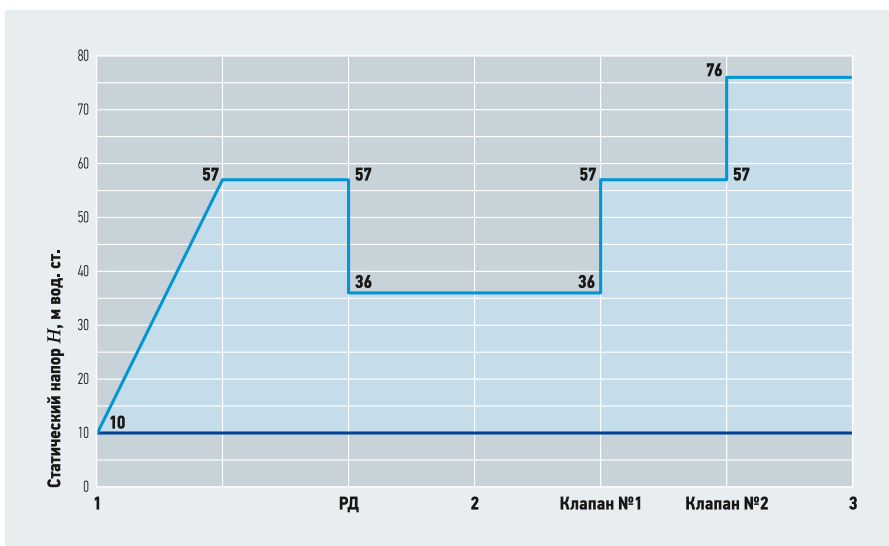


Рис. 4. Пьезометрический график узла подпитки при закрытии клапана №2 на 40%

Заключение

Показана целесообразность использования CFD-моделирования для практических инженерных расчётов. Подобные численные эксперименты по визуализации гидравлических режимов работы, как отдельных элементов, так и всей системы теплоснабжения в целом, позволяют принимать обоснованные технические решения, а полученные результаты дают возможность проанализировать последствия принимаемых управленческих решений на гидравлическую устойчивость. Появляется возможность оперативного внесения надлежащих корректив в данные технические решения для повышения надёжности и живучести инженерных систем зданий и тепловых сетей.

1. Султангузин И.А., Яцок Т.В. Применение BIM-, VEM- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // Журнал СОК, 2019. № 3. С. 36–42.
2. Пеньковский А.В., Стенников В.А. Математическое моделирование рынка тепловой энергии в формате единой теплоснабжающей организации // Теплоэнергетика, 2018. № 7. С. 42–53.
3. Липовка Ю.Л. Влияние непосредственного водоразбора на режимы работы последовательно включённых теплообменников // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1979. № 6. С. 95–100.
4. Lipovka A.J., Lipovka Y.L. Determining hydraulic friction factor for pipeline systems. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2014. No. 7(1). Pp. 62–82.
5. Токарев В.В. Разработка методики секционирования кольцевых тепловых сетей закрытых систем теплоснабжения // Теплоэнергетика, 2018. № 6. С. 84–94.
6. Липовка Ю.Л. Математическое моделирование систем теплоснабжения с обеспечением устойчивого энергосбережения // Энергосбережение и водоподготовка, 2002. № 1. С. 89–92.
7. Новицкий Н.Н., Гребнева О.А., Токарев В.В. Исследование эффективности методов активной идентификации для теплогидравлических испытаний тепловых сетей // Теплоэнергетика, 2018. № 7. С. 54–63.
8. Липовка Ю.Л., Панфилов В.И. Экспериментальное изучение потокораспределения на автоматизированных тепловых пунктах // Энергосбережение и водоподготовка, 2008. № 2. С. 52–54.
9. Липовка Ю.Л., Калабин Д.А. Гидравлическая устойчивость в условиях неравномерной автоматизации систем теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка, 2018. № 3. С. 19–24.

References — see page 78.

CFD modeling of hydraulic modes of thermal networks. Pp. 50–52.

Alexey A. Alekseev, postgraduate student; **Alexander V. Knyuk**, postgraduate student; **Yury L. Lipovka**, Doctor of Technical Sciences, Siberian Federal University (SFU, Krasnoyarsk city)

1. I.A. Sultanguzin, T.V. Jacjuk. *Primenenie BIM-, BEM- i CFD-tehnologij dlja proektirovaniya, stroitel'stva i jekspluatacii energojeffektivnogo doma* [Application of BIM-, BEM- and CFD-technologies for the design, construction and operation of an energy efficient home]. *Zhurnal San-tehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 3. Pp. 36–42. [In Russian]
2. A.V. Pen'kovskij, V.A. Stennikov. *Matematicheskoe modelirovanie rynka teplovoj energii v formate edinoj teplosnabzhajushhej organizacii* [Mathematical modeling of the heat energy market in the format of a single heat supply organization]. *Teplojenergetika* ["Heat power engineering" Magazine]. 2018. No. 7. Pp. 42–53. [In Russian]
3. Ju.L. Lipovka. *Vlijanie neposredstvennogo vodorazbora na rezhimy raboty posledovatel'no vkljuchennykh teplobmennikov* [Influence of direct water intake on operating modes of heat exchangers connected in series]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo i arhitektura* ["Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij (Proc. of Higher Educational Institutions). Series: Construction and Architecture" Magazine]. 1979. No. 6. Pp. 95–100. [In Russian]
4. A.J. Lipovka, Y.L. Lipovka. Determining hydraulic friction factor for pipeline systems. *Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering & Technologies*. 2014. No. 7(1). Pp. 62–82.
5. V.V. Tokarev. *Razrabotka metodiki sekcionirovaniya kol'cevyykh teplovykh setej zakrytykh sistem teplosnabzhenija* [Development of a method for sectioning circular heating networks of closed heat supply systems]. *Teplojenergetika* ["Heat power engineering" Magazine]. 2018. No. 6. Pp. 84–94. [In Russian]
6. Ju.L. Lipovka. *Matematicheskoe modelirovanie sistem teplosnabzhenija s obespecheniem ustojchivogo jenergosberezhenija* [Mathematical modeling of heat supply systems with sustainable energy saving]. *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka* ["Energy saving and water treatment" Magazine]. 2002. No. 1. Pp. 89–92. [In Russian]
7. N.N. Novickij, O.A. Grebneva, V.V. Tokarev. *Issledovanie jeffektivnosti metodov aktivnoj identifikacii dlja teplogidravlicheskih ispytaniy teplovykh setej* [Research of the effectiveness of methods of active identification for thermohydraulic tests of heating networks]. *Teplojenergetika* ["Heat power engineering" Magazine]. 2018. No. 7. Pp. 54–63. [In Russian]
8. Ju.L. Lipovka, V.I. Panfilov. *Jeksperimental'noe izuchenie potokoraspredelenija na avtomatizirovannykh teplovykh punktah* [Experimental study of flow distribution at automated heating points]. *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka* ["Energy saving and water treatment" Magazine]. 2008. No. 2. Pp. 52–54. [In Russian]
9. Ju.L. Lipovka, D.A. Kalabin. *Gidravlicheskaja ustojchivost' v uslovijah neravnomernoj avtomatizacii sistem teplosnabzhenija* [Hydraulic stability in conditions of uneven automation of heat supply systems]. *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka* ["Energy saving and water treatment" Magazine]. 2018. No. 3. Pp. 19–24. [In Russian]