

УДК 697.341

## Моделирование и оптимизация трубопроводных сетей паропроводов промышленных предприятий

Н.Н. Елин<sup>1</sup>, П.А. Шомов<sup>2</sup>, П.А. Перов<sup>2</sup>, М.А. Голыбин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
<sup>2</sup> НТЦ Промышленная энергетика, г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: yelinnn@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Известные компьютерные программы для моделирования гидравлических и тепловых режимов эксплуатации систем пароснабжения обеспечивают достаточно высокую точность расчетов при условии движения в них перегретого пара. Однако на практике встречаются случаи, когда на отдельных участках сетей паропроводов по различным причинам в определенные периоды времени происходит частичная конденсация пара и при этом используемые методы расчета становятся непригодными. Появление конденсата в паропроводах приводит к уменьшению энергетической эффективности и снижению надежности систем пароснабжения. В связи с этим необходима корректировка существующих методов расчета для учета этого случая.

**Материалы и методы:** Предлагаемая математическая модель процесса основана на решении системы уравнений, описывающих гидродинамические и тепломассообменные процессы при движении как перегретого, так и влажного пара в трубопроводных сетях сложной структуры, дополненной расчетными соотношениями для теплофизических характеристик теплоносителя. Модель сети паропроводов, содержащей несколько потребителей и источников, представлена в виде ориентированного графа.

**Результаты:** Разработан метод двухстадийной увязки кольцевых трубопроводных сетей, транспортирующих как перегретый, так и влажный пар, при наличии в них дренажей. На основе данного метода предложена методика оценки эффективности использования паропреобразователей на входе паропотребителей.

**Выводы:** Предложенная математическая модель процесса и алгоритм ее численной реализации позволяют повысить точность расчетных прогнозов режимов работы трубопроводных сетей паропроводов и их энергетическую эффективность.

**Ключевые слова:** пароснабжение, трубопроводная система, теплофизические свойства, гидравлический расчет, тепловой расчет, ориентированный граф.

## Modeling and optimization of steam pipeline networks in industrial enterprises

N.N. Yelin<sup>1</sup>, P.A. Shomov<sup>2</sup>, P.A. Perov<sup>2</sup>, M.A. Golybin<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation  
<sup>2</sup> STC Industrial energetics, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: yelinnn@mail.ru

### Abstract

**Background:** The known computer codes for modeling hydraulic and thermal operating regimes of steam supply systems provide sufficient calculation accuracy under the condition of overheated steam motion in the systems. However, in practice, partial steam condensation may be observed in certain parts of the steam pipelines in certain periods of time, which makes the known methods of calculation useless. Such condensation in steam pipelines leads to a decrease in energy efficiency and reliability of the steam supply systems. Therefore, the existing computational methods should be corrected in order to take into account this case.

**Materials and methods:** The proposed mathematical model of the process is based on solving a set of equations that describe hydrodynamic and thermal exchange processes under the motion of overheated and moist steam in pipelines of complex structure including additional design ratios of thermo-physical properties of heat carrier. The model of pipelines grid that contains several steam customers and sources is presented as an oriented graph.

**Results:** We have developed a method of two-stage reconciliation of pipeline grids that transport both the overheated and moist steam if the pipelines have drains. Based on this method, we have suggested a procedure to estimate the efficiency of using steam transformers at steam customer inlets.

**Conclusions:** The proposed mathematical model of the process and its computational algorithm allow improving the accuracy of computational prognosis of the regimes of steam pipeline grids and their energy efficiency.

**Key words:** steam supply, pipeline system, thermo-physical properties, hydraulic calculation, thermal calculation, oriented graph.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.063-066

Существующие методы расчета трубопроводных сетей паропроводов промышленных предприятий часто используют ряд допущений, отрицательно влияющих на достоверность их результатов [1–3]. В первую очередь это относится к игнорированию возможности частичной конденсации пара, которая может происходить в трубах малого диаметра (до 100 мм) вблизи удаленных паропотребителей [4, 5]. Появление в паропроводе конденсата отрицательно влияет на его технические характеристики по следующим причинам:

- 1) увеличение гидравлических сопротивлений [6];
- 2) увеличение потерь теплоносителя через дренажи;
- 3) проблемы с измерением расхода пара у потребителя [7];
- 4) снижение надежности, обусловленное гидроударами при выносе скоплений конденсата.

Ниже предлагается методика расчета гидравлических и тепловых режимов сложных производственных систем пароснабжения, учитывающая максимальное количество параметров, и ее компьютерная реализация.

Модель сети паропроводов представлена ориентированным пространственным графом, ребра которого являются участками трубопровода, а вершины могут быть узлами сети, источниками либо потребителями.

В процессе расчета реальной сети учитываются дренажи конденсата и местные сопротивления, коэффициент сопротивления которых задается как переменная величина в целях моделирования процесса регулирования потокораспределения.

Методика расчета простого участка включает в себя несколько расчетных процедур:

- расчет теплофизических параметров теплоносителя [8] (плотность, энтальпия, энтропия, теплоемкость, вязкость, скорость звука, коэффициент Джоуля–Томсона);
- расчет фазового состояния теплоносителя (массовые и объемные концентрации паровой и жидкой фазы, скорость теплоносителя);
- гидравлический расчет потока теплоносителя [6] (истинные объемные концентрации паровой и жидкой фазы, коэффициент гидравлического сопротивления, удельные потери давления);
- тепловой расчет участка трубопровода [2, 3].

Эти процедуры используются основной программой EnergyFlow [9] для расчета распределения расходных и теплофизических параметров теплоносителя по длине участка (концентрации фаз, скорость, давление, энтальпия, температура) путем решения уравнения энергии в виде первого закона термодинамики. На рис. 1 представлен пример результатов расчета для случая, когда на некотором

расстоянии от начала участка начинается конденсация части пара. При этом скорость смеси уменьшается, уменьшение температуры происходит быстрее, а плотность теплоносителя и гидравлические потери увеличиваются.

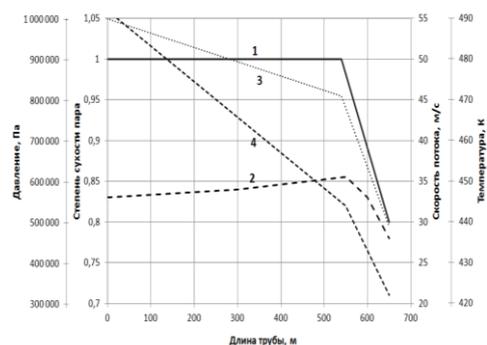


Рис. 1. Изменение параметров потока теплоносителя по длине простого участка: 1 – степень сухости; 2 – скорость смеси; 3 – давление; 4 – температура

Расчет потерь теплоносителя через дренажи выполнялся по методикам [7, 10].

Результаты показали, что появление конденсата приводит к увеличению потерь. На рис. 2 в качестве примера представлены результаты расчета для давления в трубопроводе 1,4 МПа и температуры 200 °С для перегретого пара и 196 °С для влажного пара при массовом паросодержании 0,5. Несмотря на то, что критическое отношение давлений для пароводяной смеси больше, чем для перегретого пара (абсциссы точек В и А соответственно), массовая скорость больше за счет более высокой плотности.

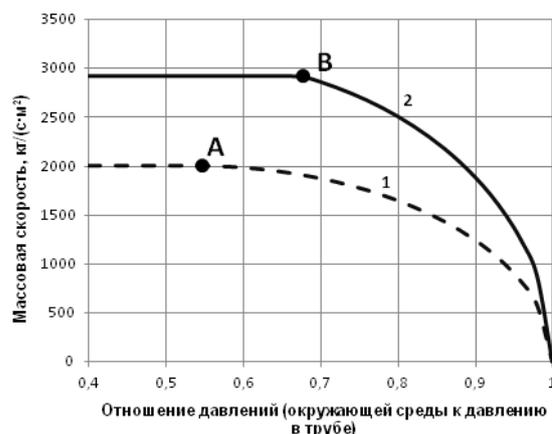


Рис. 2. Зависимость массовой скорости при истечении теплоносителя от отношения давлений: 1 – перегретый пар; 2 – влажный пар

Потокораспределение в сети паропроводов рассчитывается путем численного решения системы уравнений I закона Кирхгофа (количество уравнений равно количеству узлов сети) и II закона Кирхгофа (количество уравнений равно количеству замкнутых контуров плюс количество источников пара минус еди-

ница). Увязочные расходы рассчитываются по методу Лобачева-Кросса.

Использование такого подхода, обычно и хорошо себя зарекомендовавшего для сложных трубопроводных сетей, транспортирующих несжимаемые среды и даже сжимаемые без фазовых переходов [11], в нашем случае оказалось не всегда возможным. Проблемы в гидравлической увязке сложной многокольцевой сети возникают в тех случаях, когда на одном из этапов итерационного процесса текущая величина расхода на одном или нескольких участках становится настолько малой, что расчет этих участков показывает появление в них конденсата и, следовательно, увеличение потерь давления (рис. 1), которое, в свою очередь, требует дальнейшего уменьшения расхода. При этом устойчивость итерационного процесса не обеспечивается, и найти решение становится невозможно. Выполненные нами вычислительные эксперименты показали, что при одних и тех же исходных данных вычислительная процедура гидравлической увязки сети может быть как устойчивой, так и неустойчивой, в зависимости от того, насколько близко задаваемое начальное потоко-распределение к реальному.

Для решения данной проблемы предлагается двухстадийный процесс гидравлической увязки сети паропроводов. На первом этапе расчет проводится при средних величинах давления и температуры теплоносителя (перегретого пара), по которым рассчитываются его одинаковые для всей сети теплофизические параметры. Величины увязочных расходов определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений с учетом взаимного влияния смежных контуров:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta q_{I1} \\ \Delta q_{II} \\ \dots \\ \Delta q_{N} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} \Delta h_I \\ \Delta h_{II} \\ \dots \\ \Delta h_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\Delta h_i$  и  $\Delta q_i$  – невязка потерь напора и увязочный расход в  $i$ -м контуре ( $i = 1, \dots, N$ ). Элементы матрицы  $[A]$ , рассчитанные из начального потоко-распределения для соответствующего кольца, на ее главной диагонали равны сумме произведений сопротивления участка на расход потока по нему, а недиагональные элементы равны произведению сопротивления участка на расход по нему для участка, являющегося общим для двух колец.

Полученное на первом этапе потоко-распределение используется в качестве начального на втором этапе, когда расчет проводится с учетом всех факторов: изменений расходных и теплофизических параметров потока по длине каждого участка, возможных фазовых пере-

ходов (конденсация/испарение), потерь в дренажах и др.

На данном этапе для увязки применяется метод Лобачева-Кросса, в котором величинами недиагональных компонентов матрицы  $[A]$  пренебрегают.

Предлагаемая методика оформлена в виде компьютерной программы EnergyFlow, тестирование которой производилось путем сравнения результатов:

- модельных расчетов с полученными с помощью программы [1];
- расчетов реальной системы пароснабжения с натурными замерами.

В обоих случаях расхождения по величинам изменения давления и температуры не превышали 5 %.

Программа EnergyFlow использовалась для анализа фактических режимов эксплуатации системы пароснабжения одного нефтеперерабатывающего завода и разработки предложений по ее оптимизации. В результате расчетов было выявлено фрагменты трубопроводной сети, где происходит частичная конденсация пара.

Разработан ряд предложений по замене нескольких участков паропроводов на трубы меньшего диаметра и повышению давления пара в системе. Это дает возможность уменьшить расход пара за счет использования паропреобразователей [12] на входе некоторых паропотребителей. Например, для дроссельно-увлажнительных струйных аппаратов, в которых рабочей средой является перегретый пар, а эжектируемой – химически очищенная вода, удельный расход воды (на 1 кг перегретого пара) рассчитывается из теплового баланса:

$$\mu = \frac{i_0 - i_1}{i_1 - i_w}, \quad (2)$$

где  $i_0$ ,  $i_w$  и  $i_1$  – энтальпия перегретого пара, химически очищенной воды и пара, требуемого абонентом.

Следовательно, при потребности в паре  $G_0$ , кг/с, его выработку можно сократить на величину

$$\Delta G_s = G_0 \frac{\mu}{1 + \mu}, \quad (3)$$

заменив его таким же количеством химически очищенной воды.

Экономия топлива при этом составит

$$\Delta B = (b_s - b_w) \Delta G_s, \quad (4)$$

где  $b_s$  и  $b_w$  – удельные расходы топлива на выработку 1 кг пара с параметрами  $p_0$ ,  $t_0$ ,  $i_0$  и на подогрев химически очищенной воды. Совместное решение (2)–(4) дает

$$\Delta B = (b_s - b_w) G_0 \frac{i_0 - i_1}{i_0 - i_w}. \quad (5)$$

Чаще всего вода подогревается за счет ВЭР, и поэтому вторым слагаемым в скобках в формуле (5) можно пренебречь.

Согласно (5), как и следовало ожидать, экономия топлива тем больше, чем выше параметры пара, поступающего от источника ( $i_0$ ), и чем выше температура подогрева химически очищенной воды ( $t_w, i_w$ ).

#### Список литературы

1. **Гидравлические** и теплогидравлические расчеты ZuluHydro, ZuluThermo, ZuluGaz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.politerm.com.ru
2. **Цветков В.Е.** Организация пароснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1979. – 206 с.
3. **Теплоснабжение** / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
4. **Елин Н.Н., Жуков Б.В.** Моделирование режимов эксплуатации паропроводов тепловых сетей при пониженных нагрузках // Теплоэнергетика. – 2000. – Т. 47, № 12. – С. 1106–1109.
5. **Перов П.А.** Моделирование трубопроводных систем пароснабжения // Труды XXVII Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-27». – Саратов, 2014. – Т.9. – С. 17–18.
6. **Елин Н.Н.** Метод расчета коэффициента сопротивления газожидкостного потока // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т. 55, № 4. – С. 65–68.
7. **Елин Н.Н., Кормашова Е.Р.** Измерение расхода парожидкостной смеси стандартными диафрагмами // Теплоэнергетика. – 1999. – Т. 46, № 2. – С. 154–158.
8. **«Облачный» сервис** по свойствам рабочих веществ для теплотехнических расчетов / В.Ф. Очков, К.А. Орлов, М.Л. Френкель, А.В. Очков, В.Е. Знаменский // Теплоэнергетика. – 2012. – № 7. – С. 79–86.
9. **Гольбин М.А., Перов П.А.** Компьютерная программа для моделирования режимов эксплуатации паропроводов // Информационная среда вуза: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2014. – С. 533–538.
10. **Гольбин М.А., Перов П.А., Крупнов С.А.** Моделирование процессов дросселирования водяного пара // Информационная среда вуза: материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2014. – С. 565–568.
11. **Абрамов Н.Н.** Расчет водопроводных сетей. – М.: Стройиздат, 1983. – 275 с.
12. **Соколов Е.Я., Зингер Н.М.** Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

#### References

1. *Gidravlicheskie i teplogidravlicheskie raschety Zulu-Hydro, ZuluThermo, ZuluGaz* [Hydraulic and thermohydraulic

calculations ZuluHydro, ZuluThermo, ZuluGaz]. Available at: www.politerm.com.ru

2. Tsvetkov, V.E. *Organizatsiya parosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij* [Steam supply organization at industrial enterprises]. Moscow, Energiya, 1979. 206 p.

3. Ionin, A.A., Khlybov, B.M., Bratenkov, V.N., Terletskaya, E.N. *Teplosnabzhenie* [Heat supply]. Moscow, Stroyizdat, 1982. 336 p.

4. Elin, N.N., Zhukov, B.V. Modelirovanie rezhimov ekspluatatsii paroprovodov teplovykh setey pri ponizhennykh nagruzkakh [Modelling of operation regimes of steam pipelines of heating systems under reduced loads]. *Teploenergetika*, 2000, vol. 47, no. 12, pp. 1106–1109.

5. Perov, P.A. Modelirovanie truboprovodnykh sistem parosnabzheniya [Modelling of pipeline steam supply systems]. *Trudy XXVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh MMTT-27»* [Collected works of the XXVIIth International scientific conference «Mathematical methods in technics and technologies MMTT-27»]. Saratov, 2014, vol. 9, pp. 17–18.

6. Elin, N.N. Metod rascheta koeffitsienta soprotivleniya gazozhidkostnogo potoka [Method of calculating gas-liquid flow resistance coefficient]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 1988, vol. 55, no. 4, pp. 65–68.

7. Elin, N.N., Kormashova, E.R. Izmerenie raskhoda parozhidkostnoy smesi standartnymi diafragmami [Measuring of vapour-liquid mixture consumption by standard orifices]. *Teploenergetika*, 1999, vol. 46, no. 2, pp. 154–158.

8. Ochkov, V.F., Orlov, K.A., Frenkel', M.L., Ochkov, A.V., Znamenskiy, V.E. «Oblochenny» servis po svoystvam rabochikh veshchestv dlya teplotekhnicheskikh raschetov [«Cloud» service of working fluids properties for thermotechnical calculations]. *Teploenergetika*, 2012, no. 7, pp. 79–86.

9. Golybin, M.A., Perov, P.A. Komp'yuternaya programma dlya modelirovaniya rezhimov ekspluatatsii paroprovodov [A computer program for modelling operating regimes of steam pipelines]. *Materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnaya sreda vuza»* [Proceedings of the XXIth International conference on science and technology «University informational environment»]. Ivanovo, 2014, pp. 533–538.

10. Golybin, M.A., Perov, P.A., Krupnov, S.A. Modelirovanie protsessov drosselirovaniya vodyanogo para [Modelling of water vapour pressure reduction processes]. *Materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnaya sreda vuza»* [Proceedings of the XXIth international conference on science and technology «University informational environment»]. Ivanovo, 2014, pp. 565–568.

11. Abramov, N.N. *Raschet vodoprovodnykh setey* [Water piping calculation]. Moscow, Stroyizdat, 1983. 275 p.

12. Sokolov, E.Ya., Zinger, N.M. *Struynye apparaty* [Jet apparatuses]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 352 p.

*Елин Николай Николаевич*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой гидравлики, теплотехники и инженерных сетей,  
e-mail: yelinnn@mail.ru

*Шомов Петр Аркадьевич*,  
НТЦ «Промышленная энергетика»,  
кандидат технических наук, доцент, директор,  
e-mail: shomov@list.ru

*Перов Павел Андреевич*,  
НТЦ «Промышленная энергетика»,  
инженер-теплотехник,  
e-mail: pavel\_perov@mail.ru

*Гольбин Максим Александрович*,  
НТЦ «Промышленная энергетика»,  
инженер-теплотехник,  
e-mail: maks0h@bk.ru