УДК 681.5.017: 532.542

РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТРУБОПРОВОДОВ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK SIMSCAPE

Поносова Л.В., Черемных Д.Н., Каверин А.А., Ташлыкова Е.В.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, e-mail: cheremnyhdn@gmail.com

Проанализирован технологический процесс подготовки бумажной массы учебно-экспериментальной установки целлюлозно-бумажного производства. Показана актуальность исследования систем трубопровода с целью определения потерь напора и давления. Проведен расчет участка системы трубопровода с насосом учебно-экспериментальной установки целлюлозно-бумажного производства. В результате проведённых исследований были получены значения потерь напора в системе трубопровода. С учетом полученных данных было проведено моделирование участка учебно-экспериментальной установки в среде *Matlab*/*Simulink Simscape*, получены графики переходных процессов. На основе полученных моделей и графиков в дальнейшем может быть проведен расчет системы автоматического регулирования технологических параметров. Моделирование системы в среде *Matlab*/*Simulink* предоставит возможность проводить эксперименты по разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом перед реализацией ее на реальном производстве.

Ключевые слова: трубопровод, гидравлический расчет, учебно-экспериментальная установка, уравнение Бернулли, *Matlab Simulink Simscape*

CALCULATION AND MODELING OF PIPELINE SYSTEM IN THE MATLAB SIMULINK SIMSCAPE PACKAGE

Ponosova L.V., Cheremnykh D.N., Kaverin A.A., Tashlykova E.V.

Perm national research polytechnic university, Perm, e-mail: cheremnyhdn@gmail.com

The technological process of pulp preparing has been analyzed for a training and experimental plant of a pulp and paper production. The relevance of the research pipeline systems in order to determine pressure losses has been showed. The calculation of the pipeline system of training and experimental plant of a pulp and paper production has been performed. The values of pressure loss have been received as a result of performed investigations. The Simulation of training and experimental plant area has been implemented in the Matlab/Simulink Simscape environment, diagrams of transitional processes have been received. On the basis of models and diagrams can be calculated the automatic control system of technological parameters. A simulation of the system by Matlab/Simulink environment will allow to perform experiments on the development of an automated process control system before implementing it on a real production.

Keywords: pipeline system, training and experimental setup, Bernoulli's equation, Matlab Simulink Simscape

На ход множества реальных технологических процессов различных областей производства оказывает влияние значительное количество контролируемых и неконтролируемых факторов (температура, свойства сырья, катализаторы, увеличение концентраций исходных веществ и т.п.). Для того чтобы проанализировать возможные последствия и результаты этого взаимодействия, а также с целью определения оптимальных условий ведения техпроцесса, применяется математическое моделирование [1].

Вместе с активным развитием в мире всех отраслей промышленности широкое применение все больше и больше получают методы кибернетики в химии и химической промышленности. В результате была создана новая отрасль науки, названная кибернетикой химико-технологических производств. Именно эта наука стала базой для анализа и оптимизации химических производств с использованием математического моделирования.

Математическое моделирование как новый метод исследования является важнейшим достижением кибернетики. Суть моделирования сводится к замене реальной системы или, в нашем случае, технологического процесса (объекта) к некоторой искусственной системе и дальнейшему изучению модели на компьютере для получения новой информации об этой системе или технологическом процессе (объекте). При этом стоит заметить, что моделирование позволяет проводить эксперименты с моделью системы тогда, когда делать это на реальном объекте не представляется возможным.

В данной работе представлено моделирование участка учебно-экспериментальной установки в пакете *Matlab Simulinc Simscape* с использованием данных, полученных в результате гидравлического расчета системы трубопроводов.

Рассмотренная учебно-экспериментальная установка разработана и внедрена для исследования и оптимизации системы

управления имитацией технологического процесса подготовки бумажной массы. Конструктивно установка состоит из пяти емкостей, соединенных между собой системой трубопроводов и набором технических средств автоматизации (датчики, исполнительные механизмы) [3].

Движение жидкости по трубопроводу экспериментальной установки осуществляется за счет перепада уровней энергии в начале трубопровода и в конце, который создается в результате работы насоса [6].

При гидравлическом расчете системы трубопроводов поставлена задача определения потерь напора в простом трубопроводе постоянного сечения на участке между емкостями экспериментальной установки. Для этого используется уравнение Бернулли [2], имеющее следующий вид:

$$H_{потр} = H_{ст} + K \cdot Q^m, \quad (1)$$

где K – величина, называемая сопротивлением трубопровода; Q – расход жидкости; m – показатель степени, который имеет разные значения в зависимости от режима течения; $H_{ст}$ – статический напор, представленный как некоторая эквивалентная геометрическая высота.

Как уже отмечалось выше, перепад уровней энергии, за счет которого жидкость течет по трубопроводу, создается работой насоса (рис. 1). Основным уравнением для расчета всасывающих трубопроводов также является уравнение Бернулли. Основное правило при устойчивой работе насоса: при установившемся течении жидкости в трубопроводе насос развивает напор, равный потребному [8, 11].

$$H_{нас} = H_{потр}. \quad (2)$$

На этом равенстве основывается метод расчета трубопроводов с насосной подачей.

Для нашей системы выполнен гидравлический расчет технологического трубопровода на примере первых двух емкостей с насосом.

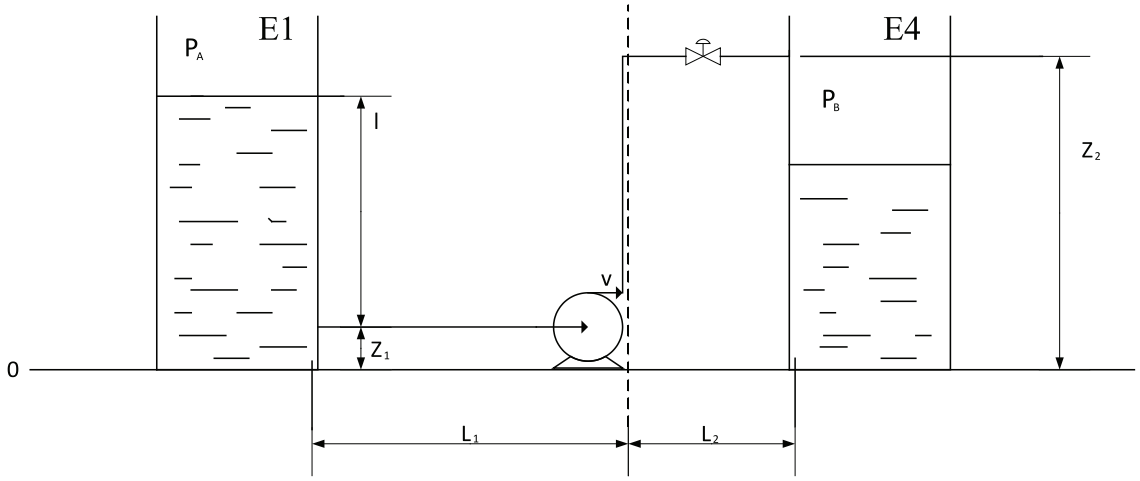

Рис. 1. Схема трубопровода между технологическими емкостями E1 и E4

Приведем для расчета начальные данные:

Давление в первой и второй емкостях E1 и E4 одинаково и равно $P_A = P_B = 1{,}2 \cdot 10^5$ Па; длина трубы от емкости E1 до насоса: $L_1 = 0{,}9$ м, длина трубы от насоса до емкости E4: $L_2 = 0{,}1$ м; диаметр труб $d = 0{,}02$ м; площадь сечения труб $F = 3{,}14 \cdot 10^{-4}$ м^2; расход перекачиваемой воды $q = 2{,}81 \cdot 10^{-4}$ м^3/с. Справочные значения плотности и динамической вязкости воды равны соответственно $\rho = 998{,}2$ кг/м^3 и $\mu = 1 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

В технологической схеме присутствуют различные виды местных сопротивлений: вентиль нормальный; отвод $\varphi = 90°$, закругление трубы на небольшой градус. Высота подъема жидкости: $\Delta Z = 1{,}2$ м.

Для нахождения скорости течения жидкости в трубе используется формула расхода:

$$q = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (3)$$

Выразив из формулы 3 скорость, получено уравнение следующего вида [7]:

$$v = \frac{q}{F}. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) начальные данные, получена следующая скорость:

$$v = \frac{2{,}81 \cdot 10^{-4}}{3{,}14 \cdot 10^{-4}} = 0{,}89 \text{ м/с}.$$

Напор, требуемый для преодоления сопротивления столба жидкости, определяется по формуле

$$H_{ст} = \Delta Z + \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + \Delta l,$$

где $\Delta l = l_2 - l_1 = -1$ м.

Тогда $H_{ст} = 0{,}2$ м.

Основной расчетной формулой для потерь напора при турбулентном течении жидкости в круглых трубах является эмпирическая формула, называемая формулой Вейсбаха – Дарси и имеющая следующий вид [9, 12]:

$$h_{пот} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \qquad (5)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; d – диаметр трубы; v – скорость движения жидкости; l – длина трубы.

Для расчета коэффициента гидравлического трения необходимо рассчитать число Рейнольдса по следующей формуле [5]:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}. \qquad (6)$$

Подставив в уравнения начальные данные, получаем число Рейнольдса: Re = 17767,96. Отсюда можно сделать вывод, что течение жидкости является турбулентным.

Кроме этого коэффициент гидравлического трения зависит от относительной шероховатости Δ/d (или Δ/r_0, где r_0 – радиус трубы). Поскольку в установке используются новые металлопластиковые трубы, то коэффициент шероховатости примем $\Delta = 7 \cdot 10^{-6}$ м, а коэффициент абсолютной шероховатости $\Delta_э = 3{,}5 \cdot 10^{-6}$ м.

Тогда критический коэффициент Рейнольдса, рассчитанный по формуле $\mathrm{Re}_{кр} = \frac{10 \cdot d}{\Delta_э}$, будет равен 57142.

В соответствии с таблицей определения коэффициента гидравлического трения, если число Рейнольдса лежит в диапазоне $4000 < \mathrm{Re} < 10 \cdot \left(\frac{d}{\Delta_э}\right)$, то коэффициент λ определяется по полуэмпирической формуле Блазиуса:

$$\lambda_Т = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0{,}25}}. \qquad (7)$$

Подставив известные данные в уравнение 7, получаем коэффициент гидравлического трения $\lambda_Т = 0{,}027$.

Тогда потери на участке трубопровода

$$h_{пот} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0{,}027 \cdot \frac{1}{0{,}02} \cdot \frac{0{,}89^2}{2 \cdot 9{,}8} = 0{,}0545 \text{ м}.$$

Для расчета потерь напора в местных сопротивлениях необходимо выбрать справочные значения коэффициентов местных потерь для соответствующих местных сопротивлений: $\xi_1 = 0{,}5$ – коэффициент местных потерь для элемента – вход в трубу; $\xi_2 = 5$ – коэффициент местных потерь для вентиля нормального; $\xi_4 = 1{,}2$ – коэффициент местных потерь для поворота трубы на $\varphi = 90°$; $\xi_5 = 0{,}2$ – коэффициент местных потерь для закругления трубопровода; $\xi_6 = 1$ – коэффициент местных потерь для элемента – выход из трубы;

Тогда для всего трубопровода

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5 + \xi_6. \qquad (8)$$

Местные потери на всей протяженности трубопровода рассчитываются по следующей формуле:

$$h_м = \frac{\xi \cdot v^2}{2 \cdot g}. \qquad (9)$$

Подставив в уравнение (9) данные, получим потери напора в местных сопротивлениях $h_м = 0{,}319$ м.

Тогда общие потери напора в трубопроводе будут складываться из потерь напора на участке трубопровода и потерь напора на местных сопротивлениях:

$$h = h_м + h_{пот} + h_{ст} = 0{,}566 \text{ м}.$$

В результате получаем, что потребный напор равен общим потерям напора в трубопроводе.

Для технологического процесса учебно-экспериментальной установки было проведено моделирование локальных контуров [4]. Все объекты были описаны с помощью математических формул, однако в модели не были учтены потери напора в трубопроводе и местные потери напора жидкости, поэтому было проведено моделирование гидравлической системы учебно-экспериментальной установки в пакете *Matlab Simulink* в среде моделирования *Simscape* с библиотекой *Sim Hydraulics* [10]. Данная среда предоставляет набор модулей для моделирования и симуляции физических систем, содержащих механические, гидравлические, электрические и другие компоненты. *Simscape* позволяет описать физическую

структуру системы на более высоком уровне, чем математические выражения, лежащие в основе этой системы.

С помощью библиотеки *Sim Hydraulics* была собрана модель гидравлической системы учебно-экспериментальной установки. Схема модели экспериментальной установки в среде *Simulink* приведена на рис. 2. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

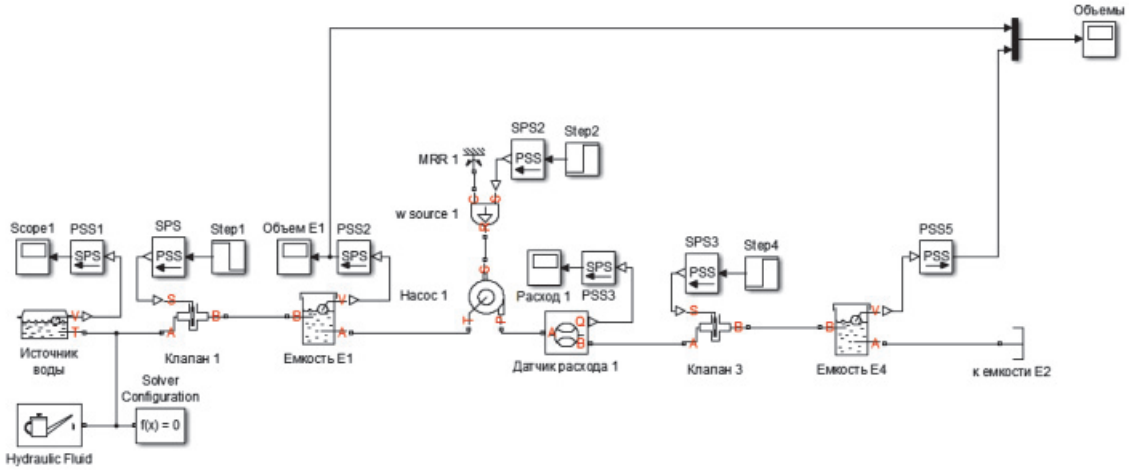

Рис. 2. Схема модели учебно-экспериментальной установки в среде Simulink

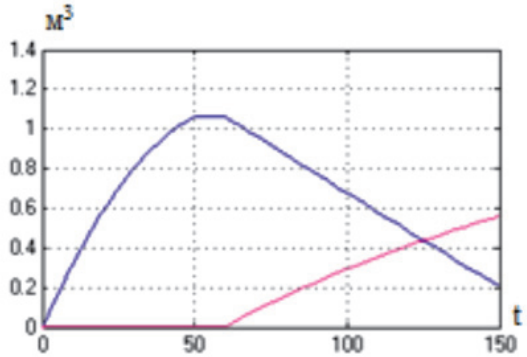

Рис. 3. График изменения объема жидкости в емкостях E1, E4

В результате проведенной работы были рассчитаны потери напора в трубопроводе учебно-экспериментальной установки. Полученные результаты позволили оценить влияние внешних и внутренних факторов на технологический процесс. На основе проведенных расчетов проводят выбор насоса, который будет обеспечивать требуемый напор в трубопроводе.

С учетом гидравлических расчетов было проведено моделирование участка технологического процесса, получены графики, на основании которых будет проводиться дальнейшее исследование системы, направленное на разработку систем автоматического регулирования технологического процесса, а именно на расчет ПИД-регуляторов.

Компьютерное моделирование технологических систем является актуальным и перспективным направлением, поскольку оно позволяет повысить точность и качество управления процессами. В свою очередь математические модели позволяют проводить исследования системы или технологического процесса быстро и без существенных затрат.

Список литературы

1. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

2. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982 – 424 с.

3. Даденков Д.А., Поносова Л.В., Петроченков А.Б., Друзьякин И.Г., Лейсле А.Г. Разработка экспериментальной установки имитации работы контуров регулирования технологических процессов производства бумаги предприятия ООО «Пермский картон» // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2010. – С. 196–206.

4. Даденков Д.А., Черемных Д.Н., Честиков А.П. Синтез и моделирование локальных контуров регулирования учебно-экспериментальной установки целлюлозно-бумажного производства // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – Т. 1. – № 7. – С. 131–142.

5. Даденков Д.А., Поносова Л.В., Друзьякин И.Г., Петроченков А.Б. Анализ методов решения задачи подобия технологических процессов производства бумаги в экспериментальных и производственных условиях // Научные исследования и инновации. – 2012. – С. 175–184.

6. Долгачев Ф.М., Лейко В.С. Основы гидравлики и гидропривод. – М.: Стройиздат 1981. – 182 с.

7. Леонов А.М., Михеев В.А., Москаленко Т.В., Данилов О.С. Гидравлический расчет трубопровода от станции угольная до нерюнгринской ГРЭС // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – С. 404–408.

8. Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Фатеев И.В. Расчет сложных трубопроводов с насосной подачей: учебное пособие по курсу «Гидравлика, гидромашины и гидроприводы» для студентов машиностроительных специальностей / под редакцией профессора Ю.А. Беленков – М.: МАМИ, 2003. – 48 с.

9. Микитюк А.В., Кажаров В.М., Шугай П.Ю. Гидравлический расчет поливного полиэтиленового трубопровода системы капельного орошения // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного агрегатного университета. – 2005. – С. 105–111.

10. Моделирование физической системы в Matlab Simscape [Электронный ресурс] URL: http://sl-matlab.ru/products/simscape (дата обращения 18.08.2014).

11. Некрасов Б.Б., Беленков Ю.А. Насосы, гидроприводы и гидропередачи. – М.: МАМИ, 1976. – 128 с.

12. Снежко В.Л., Бенин Д.М. К вопросу определения потерь напора в трубопроводах // Перспективы науки. – 2011. – С. 75–79.

References

1. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii ersperimenta v khimicheskoy tekhnologii [Methods of optimization experiment Chemical Technology]*. M.: Vysshaja shkola, 1985. 327 p.

2. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. *Gidravlika, gidromashiny I gidroprivody [Hydraulics, hydraulic and hydraulic drives]*. M.: Mashinostroenie, 1982, 424 p.

3. Dadenkov D.A., Ponosova L.V., Petrochenkov A.B., Druz'jakin I.G., Lejsle A.G. *Jenergetika. Innovacionnye napravlenija v jenergetike. CALS-tehnologii v jenergetike – Energetics. Innovative direction in Energetics*, 2010. pp. 196–206.

4. Dadenkov D.A., Cheremnykh D.N., Chestikov A.P. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jelektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija – Bulletin of perm national research polytechnic university. Electronics, informational technology, control systems,* 2013. no. 7, pp. 131–142.

5. Dadenkov D.A., Ponosova L.V., Druz'jakin I.G., Petrochenkov A.B. *Nauchnye issledovanija i innovacii – Scientific researches and innovation*, 2012, no. 1–4, pp. 175–184.

6. Dolgachev F.M., Leyko V.S. *Osnovy gidravliki b gidroprivod [Fundamentals of hydraulics and hydraulic]*. Moscow. Stroyizdat, 1981. 182 p.

7. Leonov A.M., Mikheev V.A., Moskalenko T.V., Danilov O.S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) – Mountain information-analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2009. pp. 404–408.

8. Lepeshkin A.V., Mikhaylin A.A., Fateev I.V. *Raschet slozhnyh truboprovodov s nasosnoy podachey [Calculation of complex pipeline pump-fed]*. M.: MAMI, 2003. 48 p.

9. Mikityuk A.V., Kazharov V.M., Shugay P.YU. *Politematicheskiy setevoy electronnyy nauchnyy zhurnal kubanskogo gosudarstvennogo agregatnogo universiteta – Scientific Journal of KubSAU*, 2005. pp. 105–111. Available at: http://ej.kubagro.ru.

10. *Modelirovanie fizicheskoy sistemy v Matlab Simscape(Modeling of the physical system in Matlab Simscape)*. Available at: http://sl-matlab.ru/products/simscape (accessed 7 August 2014).

11. Nekrasov B.B., Belenkov YU.A. *Nasosy, gidroprividy I gidroperedachi [Pumps, hydrodrives and hydraulic transmission]*. M.: MAMI, 1976. 128 p.

12. Snezhko V.L., Benin D.M., *Perspektivy nauki [Future science]*, 2011. pp. 75–79.

Рецензенты:

Бульбович Р.В., д.т.н., профессор, декан аэрокосмического факультета, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Цаплин А.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой общей физики, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 06.11.2014.