

УДК 523.5

М.В. Турченко¹, В.В. Андреев², А.В. Дунцев²**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ
ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**ОАО «ОКБМ им. И.А. Африкантова»¹,
Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева²

Предлагается метод определения коэффициента гидравлического трения: с помощью экспериментальных данных обучается нейронная сеть. В процессе обучения на входы сети подаются значения параметров, определяющих режим течения теплоносителя (в частности, мощность нагрева), а также данные, получаемые в результате эксперимента (температуры), на выходе же мы должны получить прогнозируемые значения коэффициента гидравлического трения. После того как ИНС будет обучена, можно прогнозировать изменение коэффициента гидравлического трения еще на ранних стадиях процесса, что позволит своевременно принять необходимые действия по управлению процессом развития ЕЦ.

Ключевые слова: естественная циркуляция, теплоноситель, гидравлическое сопротивление, искусственная нейронная сеть.

Введение

Развитие энергетики, повышение уровня безопасности (самозащитенности) энергетических установок предполагает все более широкое использование систем, основанных на естественной циркуляции рабочего тела в каналах. Указанный режим работы интересен и как штатный режим функционирования установки, и как способ обеспечения расхолаживания в случае отказа циркуляционных насосов. Сложность процессов теплоотвода, нестационарный характер этих процессов при естественной циркуляции требует проведения более точных гидравлических расчетов. Существующие расчетные модели не всегда удовлетворяют предъявляемым высоким требованиям в силу различного рода упрощений, заложенных в них при разработке. Исправление подобного рода недостатков расчетных моделей возможно на основе альтернативных способов обработки и обобщения экспериментальных результатов, основанных, в частности, на использовании искусственных нейронных сетей.

Постановка задачи

На сегодняшний день считается, что определение гидравлического сопротивления возможно лишь в установившемся движении. Для неустановившегося движения не существует способов его определения, и поэтому в гидравлике принято результаты исследований сопротивлений установившегося движения переносить на неустановившееся движение [1].

Определение потерь энергии является одним из важнейших вопросов почти любого гидравлического расчета. В гидравлических расчетах приходится иметь дело с двумя видами потерь: с потерями энергии по длине трубопровода и с потерями в местных сопротивлениях.

К потерям энергии по длине трубопровода относятся потери энергии на прямолинейных участках трубопровода. При этом за нормальную конфигурацию потока принимается конфигурация потока на прямолинейном участке трубопровода на расстояниях, достаточно удаленных от входа, что связано с постоянством течения на этом участке.

Потери энергии, вызванные изменениями геометрии трубопровода, называются местными. Причиной этих потерь является прохождение теплоносителя через всевозможные вентили, закругления, сужения и расширения трубопроводов [2].

Проблемы определения гидравлического сопротивления в ламинарном неизотермическом потоке

Кроме непостоянства потока из-за геометрических характеристик трассы, существует также проблема, связанная с неизотермичностью потока. В неизотермическом потоке температура может изменяться и по живому сечению потока, и по длине. Существенной величиной, влияющей на распределение скоростей и давлений в ламинарном потоке, является коэффициент вязкости жидкости. Непостоянство коэффициента вязкости жидкости в неизотермическом потоке выступает причиной нарушения законов распределения скоростей и давлений, свойственных изотермическому потоку.

Если, например, в изотермическом потоке в круглой трубе скорости распределяются по параболическому закону, то в потоке неизотермическом, например, в теплообменном аппарате, распределение скоростей будет подчиняться другому закону (рис. 1). Важной особенностью неизотермического потока является и то, что вследствие неодинаковой температуры жидкости в потоке возникают конвекционные течения, как правило, также изменяющие распределение скоростей, соответствующее изотермическому потоку. Это особенно проявляется в трубопроводах, расположенных вертикально. В общем случае конвекционные течения могут являться причиной нарушения равномерности движения потока и даже его ламинарности.

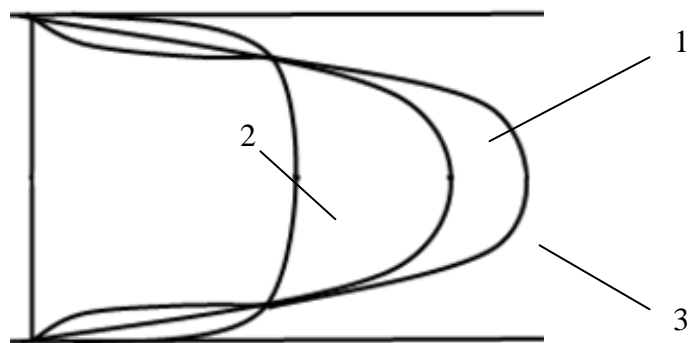


Рис. 1. Схема распределения скоростей в изотермическом и неизотермических ламинарных потоках

1 – изотермический поток; 2 – неизотермический поток (нагревание);

3 – неизотермический поток (охлаждение)

Неизотермический ламинарный поток изучен недостаточно из-за отсутствия средств измерения, не изменяющих структуру потока. Далее рассмотрим случай приближенного решения лишь одного частного случая, а именно определения потерь энергии в потоке неизотермическом только по длине. Так как полная потеря энергии по всей длине равна сумме потерь на элементарных участках, ее можно приближенно определить, рассматривая движение на каждом элементарном участке трубопровода как изотермическое, по формуле

$$h_A = \frac{G^2}{2g\omega^2 d} \int_0^l \frac{\lambda}{\gamma^2} dl \quad (1)$$

Для такого решения вопроса нужно знать закон распределения температуры вдоль трубопровода. Это позволит приближенно определить для каждого участка трубопровода коэффициент вязкости жидкости, объемный вес, число Рейнольдса и коэффициент λ .

Интеграл $\int_0^l \frac{\lambda}{\gamma^2} dl$ можно также вычислить, если изобразить зависимость $\frac{\lambda}{\gamma^2}$ от l графически. В этом случае он будет равен площади под функцией $f(\frac{\lambda}{\gamma^2})$. При этом следует обратить внимание, что при нахождении λ по диаграмме Никурадзе мы сталкиваемся с изменением вида диаграммы в зависимости от температуры потока (рис. 2) [3].

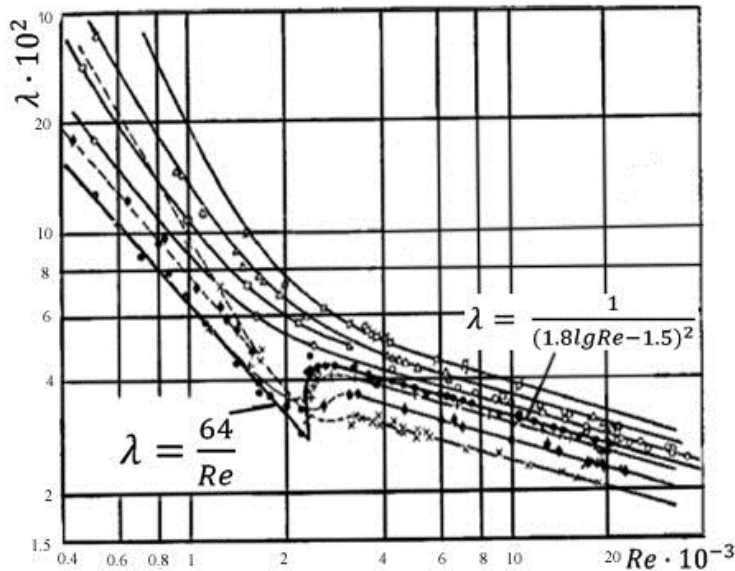


Рис. 2. Зависимость среднего значения коэффициента λ от Re при неизотермическом потоке в гладких трубах по опытам Михеева

Искусственные нейронные сети

Искусственные нейронные сети представляют собой устройства параллельных вычислений, состоящие из множества взаимодействующих простых процессоров.

Нейронная сеть является совокупностью элементов, соединенных некоторым образом так, чтобы между ними обеспечивалось взаимодействие. Эти элементы, называемые также нейронами, или узлами, представляют собой простые процессоры, вычислительные возможности которых обычно ограничиваются некоторым правилом комбинирования входных сигналов и правилом активизации, позволяющим вычислить выходной сигнал по совокупности входных. Выходной сигнал элемента может посылаться другим элементам по взвешенным связям, с каждой из которых связан весовой коэффициент или вес. В зависимости от значения весового коэффициента передаваемый сигнал или усиливается, или подавляется.

Структура связей отражает детали конструкции сети, а именно то, какие элементы соединены, в каком направлении работают соединения и каков уровень значимости (т.е. вес) каждого из соединений. Задача, которую понимает сеть, описывается в терминах весовых значений связей, связывающих элементы.

С каждым процессором (т.е. обрабатывающим элементом сети) связывается набор входящих связей, по которым к данному элементу поступают сигналы от других элементов сети, и набор исходящих связей, по которым сигналы данного элемента передаются другим элементам.

Каждая связь определяется тремя параметрами: элементом, от которого исходит данная связь, элементом, к которому данная связь направлена, и числом, указывающим весовой коэффициент.

Данные, используемые для обучения нейронной сети, обычно разделяются на две категории: одни данные используются для обучения, а другие – для тестирования. На

самом деле реальные качества нейронной сети выявляются только во время тестирования, поскольку успешное завершение обучения сети должно означать отсутствие признаков неправильной работы сети во время ее тестирования.

Структура связей отражает то, как соединены элементы сети. Для решения поставленной задачи подходят многослойные или слоистые сети, схематично представленные на рис. 3 [4].

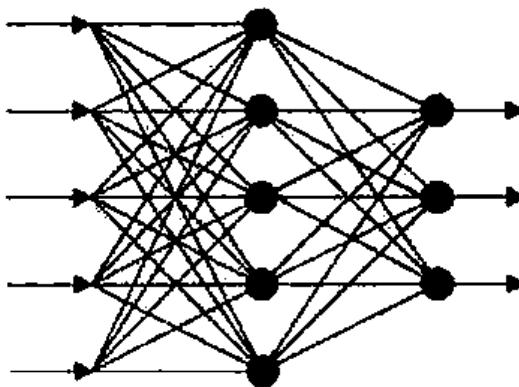


Рис. 3. Многослойная нейронная сеть

В многослойных нейронных сетях нейроны объединяются в слои. Слой содержит совокупность нейронов с едиными входными сигналами. Число нейронов в слое может быть любым и не зависит от количества нейронов в других слоях.

Нейронные сети позволяют с любой точностью вычислять произвольную непрерывную функцию. Следовательно, с их помощью можно сколь угодно точно аппроксимировать функцию, порожденную любой непрерывной системой.

Многослойная сеть с одним скрытым слоем и сигмоидными функциями активации, обучаемая по градиентному алгоритму, может аппроксимировать функции с заданной точностью в случае отсутствия ограничения на число базовых элементов в слое [5].

Описание экспериментальной установки и расчетная часть

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 4. Она представляет собой замкнутый контур циркуляции 1, выполненной из трубы внутренним диаметром 64 мм и длиной 2065 мм. Материал трубопровода нержавеющая сталь. Мощность варьируется от 0 до 10 кВт.

В контуре имеется обогреваемый пропусканием электрического тока подъемный участок 2 и охлаждаемый водопроводной водой опускной участок контура циркуляции 3. На выходе из подъемного участка установлен бак 4 с запасом теплоносителя. В состав стенда входит система компенсации изменения объема теплоносителя в воде бака, снабженного уровнемером и необходимой аппаратурой; система заполнения и осушения стенда; расходомерное устройство охлаждающего контура циркуляции; система энергоснабжения и управления.

В качестве примера получаемых результатов в табл. 1 приводятся экспериментальные данные при мощности установки $N = 10$ кВт. При этом использованы следующие условные обозначения температуры: T1-1 – температура на входе в обогреваемый участок; T1-8 – температура на выходе из обогреваемого участка; T2-1 – температура на входе в теплообменник со стороны контура охлаждения, T2-3 – температура на выходе из теплообменника со стороны контура охлаждения.

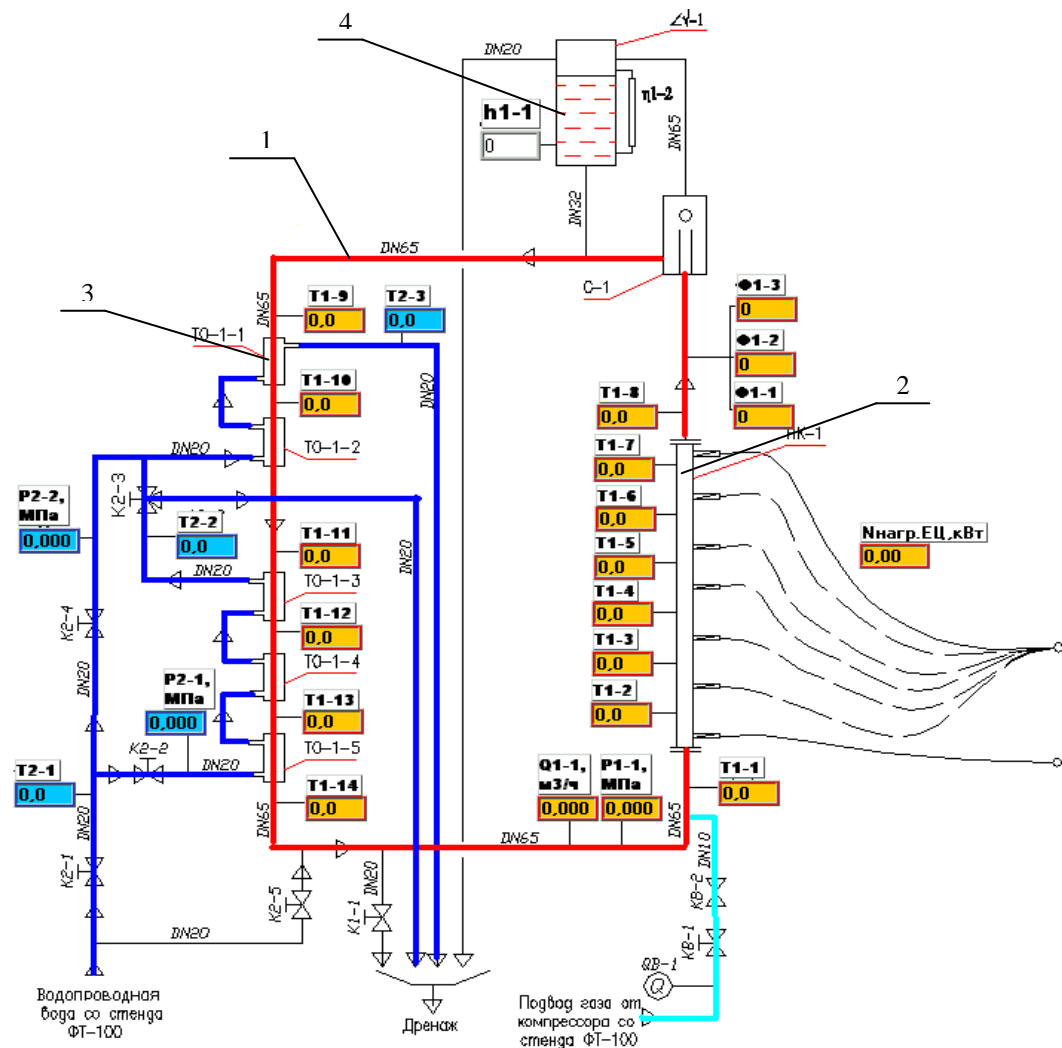


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:
 1 – замкнутый контур циркуляции теплоносителя; 2 – подъемный участок;
 3 – опускной участок; 4 – бак запаса теплоносителя

Таблица 1
 Экспериментальные значения температур, °С
 при фиксированной мощности нагрева

T1-1	T1-8	T2-1	T2-3
30,4	51	5,9	10,1
44,8	60,7	5,5	10,8
55,2	70,7	5,3	12,5
65,7	74,6	5,2	12,1
70,1	82,3	4,9	13,7
76,2	85,9	4,7	13,5
80,6	89,2	4,5	14,1
84,5	92,2	4,5	14,1
87,3	95	4,5	15,5
90	97	4,5	16,5
91,9	97,7	4,7	16,7
93,4	99,8	4,5	16,7
95,2	100,1	4,4	16,3
96,2	100,7	4,3	16,7

В замкнутом контуре, на некоторой части которого генерируется пар, плотность среды в подъемных и опускных линиях различна, и вследствие действия сил гравитации возникает естественная циркуляция. Разница в значениях плотности среды опускных и подъемных участков создает движущий напор, величина которого для вертикальных каналов определяется из соотношений, записанных для давления в нижней точке контура циркуляции. При движении среды величину этого давления можно выразить двояким образом:

$$P = P_0 + h \rho_{\text{оп}} g - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}}, \quad (2)$$

$$P = P_0 + h \rho_{\text{под}} g - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}}, \quad (3)$$

где h – высота контура; $\rho_{\text{оп}}$, $\rho_{\text{под}}$ – средняя плотность среды на опускном и подъемном участках; $\Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}}$, $\Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}}$ – гидравлическое сопротивление опускного и подъемного участков; P_0 – давление над зеркалом испарения; g – ускорение свободного падения.

Из соотношений (2) и (3):

$$h g (\rho_{\text{оп}} - \rho_{\text{под}}) = \Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}} + \Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}}, \quad (4)$$

$$h g (\rho_{\text{оп}} - \rho_{\text{под}}) - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}} = \Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}}. \quad (5)$$

Левая часть (4) называется движущим напором естественной циркуляции, правая часть (5) – полезным напором естественной циркуляции. Движущий напор расходуется на преодоление местных сопротивлений, а также потерь на трение и ускорение во всем контуре. Движущий напор, уменьшенный на величину гидравлических потерь в подъемном участке (полезный напор), может быть определен путем измерения гидравлических потерь опускного участка. Для данного контура при определенном значении мощности, подводимой к обогреваемой части, величины движущего – $S_{\text{дв}}$ и полезного $S_{\text{пол}}$ напоров, как и гидравлических потерь, определяются массовым расходом жидкости в контуре. Чем выше массовый расход M , тем ниже $S_{\text{дв}}$ и $S_{\text{пол}}$ и тем выше P .

Массовый расход воды в первом контуре из уравнения баланса мощности на обогреваемом участке (при нагреве)

$$M = N / C_p (T_{1-8} - T_{1-1}). \quad (6)$$

Теперь определим объемный расход и скорость течения рабочего тела:

$$Q = M/\rho. \quad (7)$$

$$V = Q S. \quad (8)$$

Зная среднюю скорость потока, можно вычислить значение числа Рейнольдса, по диаграмме Никурадзе определить, в каком режиме течения жидкости мы находимся, и вычислить коэффициент гидравлического трения на обогреваемом участке:

$$\text{Re} = V \cdot d/\nu. \quad (9)$$

По полученному значению числа Рейнольдса определим режим течения жидкости – ламинарный. Тогда коэффициент гидравлического трения будет определяться по итерационной формуле:

$$\lambda = 64/\text{Re}. \quad (10)$$

Таблица 2

Результаты расчета параметров потока теплоносителя

M , кг/ч	Q , м ³ /ч	V , м/с	ν , (м ² /с) 10 ⁻⁶	Re	λ
1	2	3	4	5	6
0,385433	0,000385	3,67E-05	0,801	2,792294	22,92022
0,39165	0,000392	3,73E-05	0,658	3,453955	18,52948

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
0,441496	0,000441	4,2E-05	0,475	5,39359	11,86594
0,485646	0,000486	4,62E-05	0,413	6,82361	9,3792
0,539607	0,00054	5,13E-05	0,413	7,581789	8,44128
0,39807	0,000398	3,79E-05	0,365	6,328657	10,11273
0,458157	0,000458	4,36E-05	0,365	7,283926	8,786471
0,516645	0,000517	4,91E-05	0,326	9,19642	6,95923
0,495557	0,000496	4,71E-05	0,326	8,821056	7,255367
0,485646	0,000486	4,62E-05	0,326	8,644635	7,403436
0,476123	0,000476	4,53E-05	0,326	8,475132	7,551505
0,564705	0,000565	5,37E-05	0,294	11,14599	5,741978
0,527876	0,000528	5,02E-05	0,294	10,41907	6,142581
0,622623	0,000623	5,92E-05	0,294	12,28916	5,20784
0,527876	0,000528	5,02E-05	0,294	10,41907	6,142581

Альтернативным путем решения задачи нахождения коэффициента гидравлического трения является использование искусственных нейронных сетей. С помощью экспериментальных данных мы сможем обучить нейронную сеть. В процессе обучения на входы сети подаются значения параметров, определяющих режим течения теплоносителя (в частности, мощность нагрева), а также данные, получаемые в результате эксперимента (температуры T1-1, T1-8, T2-1, T2-3), на выходе же должны получить прогнозируемые значения коэффициента гидравлического трения. После того как ИНС будет обучена, можно будет прогнозировать изменение коэффициента гидравлического трения на ранних стадиях процесса, что позволит своевременно принять необходимые действия по управлению процессом развития ЕЦ.

Выводы

1. С помощью представленной в работе экспериментальной установки и использования расчетных программ, реализующих искусственную нейронную сеть, возможно решение задачи по нахождению коэффициента гидравлического трения в неизотермическом по длине потоке для неустановившегося режима течения жидкости.

2. Одним из результатов решения поставленной задачи может явиться аппроксимация экспериментальных и расчетных данных в виде зависимости коэффициента гидравлического трения от скорости потока и температуры рабочего тела. Данная поверхность позволит уйти от необходимости использования приближенных кривых Рейнольдса, а также использовать данные, полученные при развитии циркуляции, а не при ее установившихся значениях.

3. Построение этой обобщенной поверхности позволит визуализировать и предсказать поведение жидкости в канале, что, в свою очередь, даст возможность выбирать область работы установки с наименьшими потерями энергии потока, а также влиять на поток жидкости, используя имеющиеся для этого способы.

Библиографический список

1. Турченко, М.В. Повышение уровня безопасности установок, работающих на естественной циркуляции теплоносителя / М.В. Турченко, В.В. Андреев // Актуальные вопросы современной техники и технологий: 2-я Международная научная заочная конференция». – Липецк, 2010.
2. Альтшуль, А.Д. Примеры расчетов по гидравлике / А.Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1982.

3. **Никулин В.А.** Гидрогазодинамика течений с тепломассообменом / В.А. Никулин. – Ижевск. 1988.
4. **Круглов, В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 382 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.07.2011*

M.V. Turchenko, V.V. Andreev, A.V. Duntsev

MODELLING OF FACTOR OF THE HYDRAULIC FRICTION AT THE UNSTEADY CURRENT OF THE LIQUID BY MEANS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

In the given work the method of definition of factor of a hydraulic friction is considered. By means of experimental data we train a neural network. On network inputs values of the parameters defining a mode of a current of the heat-carrier move (in particular, capacity of heating), and also the data, received as a result of experiment. On exit we should receive predicted values of factor of hydraulic friction. After training of an artificial neural network, we can predict change of factor of a hydraulic friction at early stages of process. It will allow accepting in due time necessary actions on management of development of natural circulation.

Key words: natural circulation, the heat-carrier, hydraulic resistance, artificial neural network.