

УДК 532.542

ОБОБЩЕННАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ СВЕТЛЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ И МАЛОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ

Ключевые слова: гидравлика трубопроводов, потеря напора, коэффициент гидравлического сопротивления, обобщенная формула, число Рейнольдса, относительная шероховатость, противотурбулентная присадка.

В статье предлагается универсальная формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при любых режимах течения ньютоновских жидкостей в трубопроводах, учитывающая возможность применения противотурбулентных присадок.

Круг задач, решаемых в системе магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов с использованием различных гидравлических расчетов, постоянно расширяется. Одновременно с этим повышаются требования к точности и удобству проведения расчетов при проектировании объектов трубопроводного транспорта и в ходе эксплуатационной деятельности организаций-операторов магистральных трубопроводов. Одним из перспективных направлений по обеспечению качественного и своевременного выполнения гидравлических расчетов является универсализация и унификация предназначенных для этого формул с расширением границ их применимости или возможностью использования во всем требуемом диапазоне.

Главная задача гидравлического расчета трубопроводов, по которым транспортируются ньютоновские жидкости, включая магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы, состоит в определении изменения удельной энергии (потерь напора) по длине магистрали в зависимости от параметров потока транспортируемой жидкости и характеристик самого трубопровода. Ключевым этапом в проведении такого расчета является нахождение коэффициента гидравлического сопротивления λ – коэффициента Дарси, который в общем случае представляет собой функцию двух величин: числа Рейнольдса Re и эквивалентной относительной шероховатости внутренней поверхности труб ϵ . В зависимости от этих параметров течение жидкости в трубопроводе и коэффициент



В.А. Черникин
к.т.н., начальник технического отдела
ОАО «АК «Транснефтепродукт»,
г. Москва
ChernikinVA@ak.aktnp.ru



А.В. Черникин
к.т.н., доцент, академик IARE,
ведущий научный сотрудник
ООО «Трансэнергострой»,
г. Москва
ChernikinAV@pochta.ru

λ могут соответствовать одной из пяти зон (рис. 1).

Учитывая, что течение жидкости в каждой из зон имеет свои особенности и закономерности, для определения коэффициента Дарси в процессе становления трубной гидравлики было получено множество формул, вычисление по которым дает корректные результаты только в границах определенной зоны или ее части. Но магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы могут работать в диапазонах, которые относятся к разным зонам течения, что в свою очередь может усложнить гидравлический расчет по определению λ .

В гидравлических исследованиях, проводимых как за рубежом, так и в нашей стране, постоянно существовала тенденция оптимизации проведения расчетов, создания зависимостей, описывающих изменение коэффициента λ сразу в нескольких зонах. В разные годы в работах отечественных ученых (А.Д. Альтшуль, И.А. Исаев, Г.А. Адамов, Г.К. Филоненко, В.И. Черникин,

С.Р. Левин и др.) были получены такие универсальные формулы, позволяющие определять величину коэффициента Дарси во всей области турбулентного режима.

В системе магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов используются различные формулы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, что отражается в действующих нормативных документах, касающихся вопросов трубопроводной гидравлики [1, 2, 3].

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при любых режимах (зонах) течения жидкости А.В. Черникиным была предложена и обоснована единая формула [4, 5]

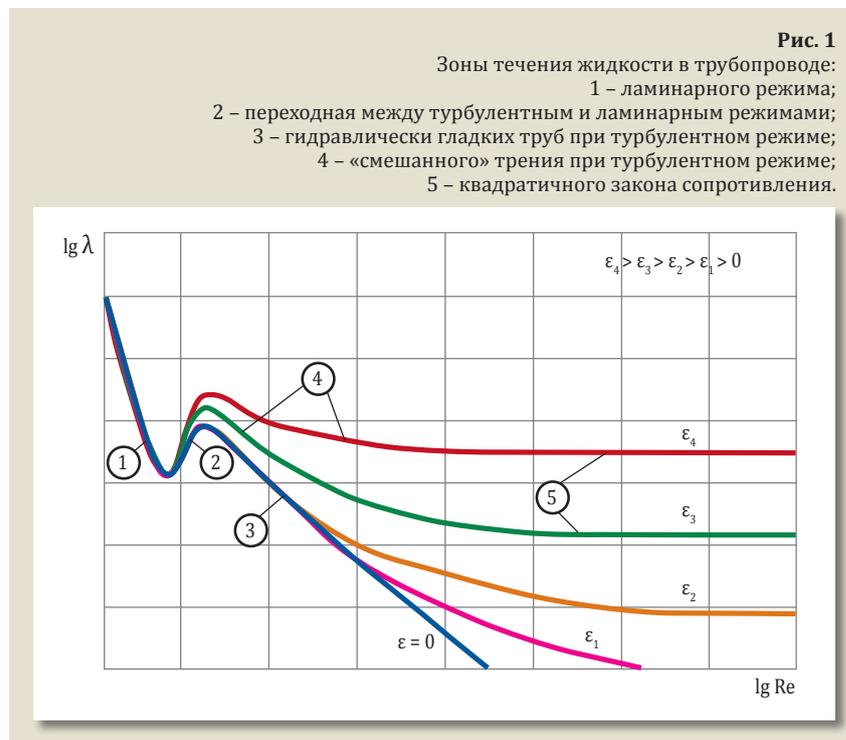
$$\lambda = 0,11 \cdot \left[\frac{\alpha + \varepsilon + X^{1,4}}{115X + 1} \right]^{0,25}, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{68}{Re}$; $\varepsilon = \frac{k}{D}$; $X = (28 \cdot \alpha)^{10}$; k – эквивалентная абсолютная шероховатость внутренней поверхности труб; D – внутренний диаметр трубопровода.

Обобщенная непрерывная зависимость (1) имеет сравнительно простую форму и дает возможность вычислять значение коэффициента гидравлического сопротивления для всех практически возможных сочетаний числа Рейнольдса и относительной шероховатости труб. Графически она полностью соответствует достаточно сложной картине изменения λ , изображенной на рис. 1 (включая скачок в узкой переходной зоне).

В силу общего характера выражения (1) из него легко получаются хорошо известные частные формулы для отдельных областей течения жидкости. Например, формула Блазиуса ($\lambda = 0,3164 / Re^{0,25}$) для турбулентного режима перекачки жидкости в зоне гидравлически гладких труб следует из (1) при $X \rightarrow 0$ и $\varepsilon = 0$, а для ламинарного режима (когда по сравнению с величиной других слагаемых можно пренебречь единицей и суммой $\alpha + \varepsilon$) зависимость (1) переходит в классическую формулу Стокса ($\lambda = 64 / Re$).

В целях расширения сферы использования формулы (1),



учитывая применение противотурбулентных присадок (ПТП) на магистральных нефтепродуктопроводах и нефтепроводах для уменьшения их гидравлического сопротивления, А.В. Черникиным было предложено [6] модифицированное выражение, позволяющее определять коэффициент Дарси при перекачке жидких углеводородов, обработанных ПТП, следующего вида

$$\lambda = 0,11 \cdot \left[\frac{\alpha + \varepsilon + X^{1,4}}{115X + 1 + Y} \right]^{0,25}, \quad (2)$$

где

$$Y = AC^p \varepsilon^q; \quad (3)$$

C – концентрация присадки; A, p, q – постоянные для ПТП конкретной марки.

Если присадка не применяется ($C = 0$), то формула (2) переходит как частный случай в выражение (1).

Указанные в (3) постоянные A, p, q уникальны для каждой конкретной марки ПТП и определяются методами математической обработки исходных данных, полученных при опытных и промышленных перекачках нефти и нефтепродуктов. Правильность определения постоянных во многом зависит от достоверности и полноты исходной информации.

Принимая во внимание существующую практику использования ПТП на магистральных нефтепродуктопроводах, авторы настоящей статьи проанализировали данные по перекачкам партий дизельного топлива с введенной в поток жидкости ПТП Necadd-447, используемой для светлых нефтепродуктов.

Для рассмотрения были взяты исходные данные (давление, расход, вязкость, плотность нефтепродукта) с действующих магистральных нефтепродуктопроводов при перекачке дизельного топлива по девяти участкам (между соседними перекачивающими станциями, включая участки с лупингами и сбросами) четырех магистральных нефтепродуктопроводов. В обработку суммарно были вовлечены сведения о 42-х прокачках дизтоплива (25 – с применением ПТП Necadd-447 различной концентрации и 17 – без использования присадки).

В итоге для ПТП Necadd-447 были определены постоянные A, p, q и установлена следующая зависимость

$$Y = 4 \cdot 10^{-7} C^{1,881} \varepsilon^{-1,435}, \quad (4)$$

где C выражается в ppm (г/т).

Использованные исходные данные и полученные результа-

Табл. 1

Данные по транспортировке дизельного топлива с противотурбулентной присадкой Necadd-447

Внутренний диаметр трубопровода, мм	Эквивалентная шероховатость труб, мм	Концентрация присадки, ppm (г/т)	Число Рейнольдса	Коэффициент гидравлического сопротивления		
				из экспериментов	по формуле	относительное расхождение, %
361	0,57	20	76387	0,018542	0,020199	-8,2
361	0,57	22	81935	0,018132	0,019575	-7,4
361	0,57	24	75977	0,018166	0,019225	-5,5
361	0,57	25	79938	0,018058	0,018908	-4,5
514	0,125	4,5	250552	0,012481	0,01386	-9,9
514	0,125	6	234760	0,011755	0,012932	-9,1
514	0,145	8	223416	0,011598	0,012531	-7,4
514	0,169	6	248862	0,01289	0,014232	-9,4
514	0,216	9,5	223416	0,012911	0,013787	-6,4
514	0,103	6	251060	0,011905	0,011964	-0,5
514	0,115	9,3	223416	0,011927	0,010849	9,9
514	0,074	11	192728	0,009526	0,008674	9,8
357	0,343	13	99029	0,017174	0,018495	-7,1
513	0,364	10	109916	0,01651	0,017652	-6,5
513	0,364	18	112041	0,016242	0,014788	9,8
513	0,364	10	219832	0,015277	0,016521	-7,5
513	0,364	18	224081	0,015028	0,013851	8,5
513	0,263	3,5	96520	0,020188	0,019549	3,3
513	0,263	3,5	193041	0,018553	0,017951	3,4
513	0,082	10	65660	0,011659	0,011647	0,1
513	0,082	18	74852	0,008939	0,008747	2,2
513	0,082	10	131320	0,010019	0,010106	-0,9
513	0,082	18	149705	0,007682	0,007616	0,9
514	0,094	4	171105	0,012983	0,013936	-6,8
514	0,094	4	129131	0,013448	0,014654	-8,2

ты расчетов по формулам (2) и (4) представлены в табл. 1.

Среднее расхождение значений λ по всем рассмотренным случаям перекачек дизельного топлива с ПТП Necadd-447 составляет 6 %, что свидетельствует о пригодности зависимостей (4) и (2) для расчетной практики.

Выражения (2) и (4) позволяют легко решить и обратную задачу – рассчитать концентрацию присадки Necadd-447, при которой будут обеспечиваться заданные (требуемые) параметры перекачки нефтепродукта (расход, потеря напора). Необходимое для выполнения такого расчета значение коэффициента λ должно определяться из классической формулы Дарси-Вейсбаха и уравнения баланса напоров рассматриваемого участка трубопровода.

Применение обобщенной универсальной формулы (2) упростит проектные и эксплуатационные гидравлические расчеты трубопроводов, транспортирующих светлые нефтепродукты и маловязкие нефти, где необходимо вычисление коэффициента λ , в том числе расчеты по использованию на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах противотурбулентных присадок.

Выводы

Предложенная обобщенная формула позволяет определять коэффициент гидравлического сопротивления без установившегося в технической литературе разделения на режимы и зоны течения жидкостей и имеет следующие преимущества:

- унификация вычисления коэффициента гидравлического сопротивления с замещением набора расчетных зависимостей для разных режимов и зон течения жидкостей одной универсальной формулой;

- полный отказ от процедуры установления режима и зоны течения жидкости с вычислением переходных чисел Рейнольдса и выбора соответствующей формулы для расчета коэффициента Дарси;
- исключение несоответствий значений коэффициента на границах различных зон течения в случае использования разных формул, что необходимо для устойчивой работы итерационных циклов при вычислениях на ЭВМ;

- применение для любой марки противотурбулентной присадки с возможностью определения необходимой концентрации присадки (решение обратной задачи);
- возможность единого подхода к упорядочиванию нормативной базы документов в части положений, регламентирующих требования к гидравлическим расчетам магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД-75.180.00-КТН-198-09.

Унифицированные технологические расчеты объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. ОАО «АК «Транснефть», 2009.

2. РД-23.080.00-КТН-064-10. Методика расчета уставок по минимальному давлению на входе НПС. ОАО «АК «Транснефть», 2010.

3. СО 06-16-АКТНП-003-2004. Инструкция по транспортированию нефтепродуктов по магистральным нефтепродуктопроводам

системы ОАО «АК «Транснефтепродукт» методом последовательной перекачки. ОАО «АК «Транснефтепродукт», 2004.

4. Черников А.В. Обобщенная формула для коэффициента гидравлического сопротивления трубопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1997. Вып. 4-5. С. 20-22.

5. Черников А.В. Обобщение расчета коэффициента гидравлического сопротивления трубопроводов //

Наука и технология углеводородов. М.: 1998. № 1. С. 21-23.

6. Прохоров А. Д., Челинцев С. Н., Черников А. В. О коэффициенте гидравлического сопротивления магистральных нефтепродуктопроводов при перекачке дизельного топлива, обработанного противотурбулентной присадкой // Транспорт и хранение нефтепродуктов. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1999. Вып. 12. С. 4-6.