

6. Trahtengerc Ie.A., Stepin Iu.P., Andreev A.F. *Komp'yuternye metody podderzhki prinjatiia upravlencheskih reshenii v neftegazovoi promyshlennosti* [Computer methods of support of decision-making management in the oil and gas industry]. Moscow, 2005. 592 p.

7. Trubicyn V.I. *Nadezhnost' elektrostancii* [Reliable power]. Moscow, 1997. 240 p.

УДК 621.7.024

В.А. Стенин

*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова
(г. Северодвинск)*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫВКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе предложена математическая модель промывки гидравлических систем и проверена ее адекватность. В модельном эксперименте для ряда загрязнений установлена скорость витания частиц загрязнений и критическая скорость потока моющей жидкости. Проведено сопоставление результатов экспериментальных исследований и аналитических расчетов; даны рекомендации по уточнению расчетных уравнений.

Промывка системы, частицы загрязнений, критическая скорость потока, скорость свободного падения частиц в жидкости.

In the work the mathematical model of flushing hydraulic systems is suggested and its adequacy is verified. In model experiment for a number of contaminants set soaring velocity of particles pollution and critical flow velocity of washing liquid are determined. A comparison of the results of the pilot studies and analytical calculations is provided; recommendations for refinement of the estimated equations are presented.

Flushing system, dirt particles, critical flow velocity, free-falling velocity in the liquid.

Введение

Совершенствование систем, эксплуатационная надежность и долговечность их оборудования обуславливает постоянное повышение требований к чистоте внутренних полостей систем и чистоте рабочих жидкостей. Это неизбежно ведет к увеличению трудоемкости очистки трубопроводных систем. Процесс удаления механических частиц при проведении послемонтажных гидродинамических очисток следует рассматривать как движение потока с малой концентрацией твердой фазы, когда применима теория переноса одиночных частиц. Под определением «малая концентрация» подразумевают такое насыщение потока частицами, которое практически не влияет ни на гидравлическое сопротивление, ни на кинематические характеристики потока. Кроме этого, при такой концентрации взаимодействие частиц в потоке друг с другом ничтожно мало, и каждую частицу можно рассматривать как одиночную.

В вопросе о механизме переноса частиц загрязнений потоком промывочной среды на сегодняшний момент нет полной ясности. Существующие теоретические решения не дают оснований использовать их в инженерных расчетах при выявлении кризисных режимов отмывки от технологических загрязнений изделий с полостями сложной конфигурации. Результаты экспериментальных исследований гидротранспорта частиц пока недостаточно для решения задач удаления частиц из изделий сложной структуры, имеющих развитые с перегородками гидравлические полости. Поэтому вопрос математического мо-

делирования промывки гидравлических систем является весьма актуальным.

Основная часть

Для повышения эффективности процесса промывки гидравлических систем применяют различные методы, обеспечивающие отрыв частицы загрязнения от поверхности трубы, однако для оптимизации технологии промывки необходимо как аналитическое обоснование движения частиц в потоке жидкости, так и результаты экспериментальных исследований. Решение задачи о назначении рационального расхода промывочной среды (воды, масла), достаточного для переноса механических частиц, заключается в определении скорости витания (скорости свободного падения частиц в спокойной жидкости) и критической скорости (скорости взвешивания и последующего переноса частиц) [3].

Критическую скорость для горизонтальных трубопроводов аналитически определяют следующим образом [2]:

$$u_{кр} = k_1 \cdot \sqrt{a \cdot g \cdot D}, \quad (1)$$

где $k_1 = 1, 0 \dots 1, 5$ — значения опытной константы; $a = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$; ρ_2, ρ_1 — соответственно плотности частиц и моющей жидкости, $кг/м^3$; g — ускорение свободного падения, $м/с^2$; D — диаметр трубопровода, м.

Под критической скоростью гидросмеси в вертикальном трубопроводе понимается такая минимальная скорость, при которой твердые частицы еще перемещаются по всему сечению потока и не происходит обратного движения частиц в пристеночной области. При этой скорости имеют место наименьшие удельные потери напора. Для трубопроводов с углом наклона менее 60° с достаточной для практики точностью режим транспортирования следует назначать такой же, как для горизонтальных трубопроводов, а свыше 60° – как для вертикальных.

Скорость свободного падения частиц загрязнения u , м/с, можно определить по уравнению [2]:

$$u = \sqrt{\frac{\pi \cdot a \cdot g \cdot d}{6 \cdot \psi}}, \quad (2)$$

где d – средневзвешенный размер частиц, м; ψ – коэффициент сопротивления.

Скорость стесненного падения частицы загрязнения u_c , м/с, размером менее 2 мм определяют по формуле [2]:

$$u_c = u \cdot (1 - s)^n, \quad (3)$$

где s – концентрация загрязнений в моющей жидкости; $n = 5 \cdot (1 - 0,2 \cdot \lg \text{Re})$.

Критическую скорость $u_{\text{кр}}^{\text{в}}$, м/с потока жидкости в вертикальном трубопроводе, с учетом формул (2) и (3), можно найти следующим образом [2]:

$$u_{\text{кр}}^{\text{в}} = u_c + k_2 \cdot \sqrt{a \cdot s \cdot g \cdot D}, \quad (4)$$

где $k_2 = 2,5 \dots 3,5$ – граничные значения опытной константы.

Экспериментальное исследование процесса промывки гидравлических систем проводилось методом математического моделирования в среде Flow Simulation [1]. Пакет Flow Simulation программного комплекса Solid Works 2014 базируется на последних достижениях вычислительной газо- и гидродинамики и позволяет рассчитывать широкий круг различных течений, в частности: двухфазных ламинарных и турбулентных течений жидких и твердых частиц в потоке текучей среды. Проверка адекватности математической модели выполнялась путем сопоставления результатов моделирования и известных экспериментальных данных по определению скорости витания частиц загрязнения. Скорость витания частиц находили экспериментально, используя вертикальную прозрачную трубу диаметром 56 мм и высотой 1200 мм [3], [4]. Контрольная высота трубы составляла 1000 мм. Скорость витания рассчитывалась как отношение пройденного частицей пути ко времени. В пакете Flow Simulation была создана твердотельная модель вертикально установленной трубы длиной 1200 мм с восходящим током движения среды. Момент отрыва частицы от поверхности донной части трубы соответствовал скорости витания частицы. Пример определения скорости витания показан на

рис. 1. Результаты проверки адекватности математической модели реальному объекту представлены в табл. 1.

Таблица 1

Проверка адекватности математической модели

Загрязнения	Размеры, мм	Плотность, г/см ³	Скорость витания, см/с		Погрешность, %
			эксперимент	моделирование	
Дробь чугунная	0,8	7,1	62,5	60,7	2,88
Дробь свинцовая	0,5	11,34	145,0	142,0	2,07

Результаты модельного определения скорости витания характерных для судовых трубопроводных систем загрязнений показаны в табл. 2. Как видно из представленных данных, скорость витания сферических частиц напрямую зависит от их диаметра и плотности материала, побочным продуктом которого они являются.

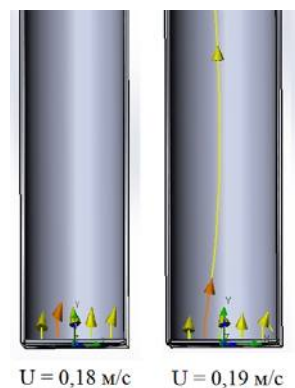


Рис. 1. Пример модельного определения скорости витания частицы в трубе

Движение частиц загрязнений (стальные частицы диаметром 1,5 мм) в трубопроводе с горизонтальным участком и вертикальным отводом (радиус кривизны отвода – 300 мм, внутренний диаметр трубы – 125 мм) при средней скорости моющей жидкости (пресная вода) $w = 2$ м/с представлено на рис. 2.

Следует отметить, что модельный эксперимент показал существенное отличие опытных данных от расчетных значений по уравнениям (1)–(4). Так, для вертикальной трубы расчетная критическая скорость потока в трубе диаметром 125 мм для чугунной дроби диаметром 0,8 мм составила $u_{\text{кр}}^{\text{в}} = 0,51$ м/с, что меньше результатов физического моделирования на 18 %. Для горизонтальных труб рекомендована стандартом скорость промывки 3...4 м/с. Расчетное значение критической скорости потока в трубе диаметром 125 мм для чугунной дроби диаметром 0,8 мм составило $u_{\text{кр}} = 3,01$ м/с, что соответствует стандарту. Однако модельный эксперимент показал, что при скорости моющей жидкости всего 2 м/с, что существенно меньше критической, также имеет место вымывание частиц загрязнений.

Скорости витания частиц загрязнений, полученные моделированием

Загрязнения	Диаметр частиц, мм	Плотность, кг/м ³	Скорость витания, м/с
Сталь	0,07	7850	0,009
	0,16		0,043
	0,23		0,08
	0,29		0,101
	0,42		0,141
Медь	0,06	8960	0,01
	0,17		0,039
	0,2		0,79
	0,44		0,12
	1,6		0,183
Титан	0,1	4505	0,012
	0,27		0,04
	0,34		0,075
	0,47		0,105
	0,95		0,139

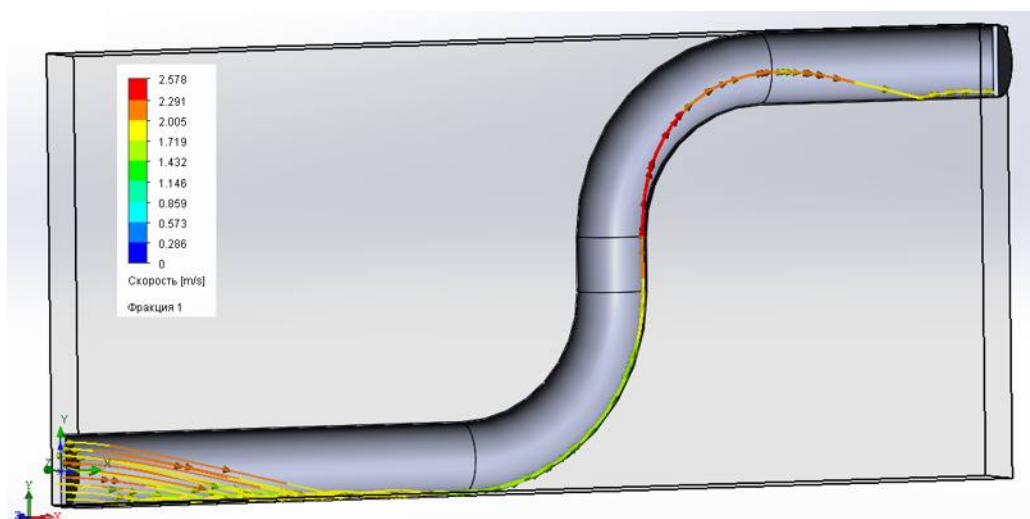


Рис. 2. Моделирование движения частиц в трубе с коленом при скорости потока 2 м/с

Выводы

1. Предложена в среде Flow Simulation математическая модель, в которой определяется скорость витания частиц загрязнений в моющей жидкости трубопроводных систем, и проверена ее адекватность.

2. В модельном эксперименте установлено некоторое отличие результатов опытов и аналитических расчетов по определению скорости витания частиц и критической скорости потока моющей жидкости. Это объясняется тем, что в аналитических уравнениях отсутствует ряд теплофизических параметров (к примеру, вязкость моющей жидкости, шероховатость стенок трубы и др.), значения которых вводятся в математическую модель и сказываются на результатах эксперимента.

Литература

1. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб., 2006. 1040 с.

2. Смолдырев А.Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле. М., 1967. 367 с.

3. Соловьев Б.В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений. Л., 1977. 75 с.

4. Соловьев Б.В., Константинов Е.А. Предпусковые очистки и промывки оборудования ЯЭУ. М., 1984. 160 с.

References

1. Alyamovskii A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [Computer modeling in engineering practice]. St-Peterburg, 2006, 1040 p.

2. Smoldyrev A.E. Gidravlicheskiy i pnevmaticheskiy transport v metallurgii i gornom dele [Hydraulic and pneumatic transport in metals and mining]. Moscow, 1967, 367 p.

3. Solov'ev B.V. Ochistka sudovykh sistem ot tekhnologicheskikh zagryaznenii [Cleaning ship systems from technological pollution]. Leningrad, 1977, 75 p.

4. Solov'ev B.V., Konstantinov E.A. Predpuskovye ochistki i promyvki oborudovaniia IaEU [Pre-start cleaning and washing of nuclear power equipment]. Moscow, 1984, 160 p.