

УДК 621.774.3

**А. Г. Орлов**

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

*alor110@mail.ru*

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук Ю. Н. Логинов

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ РАЗНОСТЕННЫХ ТРУБ

Проведено компьютерное моделирование раздачи внутренним давлением разностенных труб из стали, алюминиевого и титанового сплавов. Проведен полный факторный вычислительный эксперимент с варьированием факторов: исходной разностенности, тонкостенности и упрочняемости труб. Получены уравнения регрессии внутреннего давления в момент разрушения и конечной разностенности от перечисленных факторов. Рекомендовано применять трубы с минимальной исходной разностенностью в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления.

*Ключевые слова:* раздача труб внутренним давлением, разностенность, метод конечных элементов, разрыв труб при раздаче, напряжения разрыва

**A. G. Orlov**

## MODELING THE PROCESS OF WALL THICKNESS VARIATION PIPES EXPANDING

A computer simulation of the internal pressure expanding was performed for pipes with uneven wall thickness made of steel, aluminum and titanium alloys. A full factorial computational experiment was performed by varying factors: the initial wall thickness variation of pipes,  $D/S$  and parameter of hardening of alloys. The regression equations were obtained by the internal pressure at the time of the destruction and final wall thickness variation from these factors. It is recommended in conduits conducting high-pressure fluid to apply pipes with minimal variation in wall thickness.

*Key words:* pipe expanding with internal pressure, wall thickness variation, finite element method, expanding pipe fracture, fracture stresses

**А**ктуальным является изучение условий эксплуатации трубопроводов, работающих под внутренним давлением [1], а также про-

цесса раздачи некоторых видов труб. В статье представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов процесса раздачи разностенных труб внутренним давлением.

Моделирование провели в соответствии с планом полного факторного вычислительного эксперимента  $2^3$  (табл.). Упрочняемость рассмотренных сплавов (алюминиевого АМг2, стали 40ХГН, титанового сплава 0Т4–1) оценили по величине истинного напряжения при степени деформации  $\varepsilon = 0,5$ , которое для рассмотренных сплавов изменяется в соотношении 1 : 2 : 1,6 [2]. В качестве функций отклика выбрали конечную относительную разностенность [3] и внутреннее давление в момент разрушения.

*Таблица*

План и результаты вычислительного эксперимента

Номер опыта	Исходная разностенность ( $X_1$ ), %	Упрочняемость материала ( $X_2$ )	$D/S$ ( $X_3$ )	Конечная разностенность, %	Внутреннее давление, МПа
1	15	2	22	17,05	17,8
2	15	2	11	16,95	34,07
3	15	1	22	16,49	11,62
4	15	1	11	16,97	22,42
5	5	2	22	6,16	19,60
6	5	2	11	6,07	37,24
7	5	1	22	7,30	13,13
8	5	1	11	7,02	25,06

В результате обработки данных табл. получили следующие уравнения регрессии [4] в соответствии с учетом оценки значимости коэффициентов:

$$Y_1 = 22,62 - 1,14x_1 + 4,56x_2 - 7,08x_3 - 0,10x_1x_2 - 1,40x_2x_3 + 0,31x_1x_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = 11,75 + 5,12x_1 - 0,19x_2 + 0,33x_1x_2 - 0,093x_1x_3 + 0,095x_1x_2x_3, \quad (2)$$

где  $Y_1$  — внутреннее давление в момент разрушения, МПа;  $Y_2$  — конечная разностенность, %;  $x_1, x_2, x_3$  — кодированные значения, соответственно, исходной разностенности, упрочняемости материала,  $D/S$ ;

$$x_i = \frac{2(X_i - X_i^{\text{cp}})}{X_i^{\text{max}} - X_i^{\text{min}}}.$$

Уравнение (1) показывает, что внутреннее давление, требуемое для разрушения трубы, растет с увеличением упрочняемости материала и падает с ростом исходной разностенности и относительной тонкостенности  $D/S$ . Уравнение (2) демонстрирует, что в процессе нагружения относительная разностенность всегда увеличивается за счет уменьшения более тонкой стенки, но менее интенсивно для более упрочняющегося материала. Например, получили, что разрушение труб с исходной разностенностью 15 % из рассмотренных сплавов АМг2, 40ХГН и 0Т4–1 происходит при внутренних давлениях 22,4 МПа; 34,2 МПа и 24 МПа соответственно. В процессе раздачи разностенность увеличилась с 15 до 17 %, рост наружного диаметра не превысил 5 %. Разрыв трубы происходит всегда в области тонкой стенки [5]. Изменение разностенности труб в операции редуцирования отражено в работе [6]. Применительно к титановому сплаву 0Т4–1 допущено упрощение в описании свойств как изотропной среды, более точным явился бы подход с позиции анизотропии [7].

Таким образом, увеличение исходной разностенности труб ускоряет процесс их разрушения в области тонкой стенки, поэтому в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления, рекомендуется применять трубы с минимальной исходной разностенностью.

### Литература

1. Гумеров А. Г., Ямалеев М. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. М. : Недра, 2001. 231 с.
2. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М. : Metallurgia, 1976. 488 с.
3. Столетний М. Ф., Клемперт Е. Д. Точность труб. М. : Metallurgia, 1975. 240 с.
4. Адлер В. И., Маркова Ю. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 276 с.
5. Orlov G. A., Kotov V. V., Orlov A. G. Simulation of the behavior of pipes with variable wall thickness under internal pressure // Metallurgist. 2017. V. 61, № 1–2. P. 106–110.
6. Орлов А. Г., Логинов Ю. Н. Моделирование изменения разностенности при редуцировании труб // Magnitogorsk rolling practice. 2019. С. 79–80.
7. Логинов Ю. Н., Смирнов В. Г., Котов В. В. Обоснование влияния анизотропии на разнотолщинность холоднокатаных труб из титанового сплава // Производство проката. 2008. № 2. С. 28–31.