

Численное моделирование многофазных течений в трубах с переменным поперечным сечением

М.В. Куропаткин^{1,2}, П.Е. Спесивцев²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Московский научно-исследовательский центр «Шлюмберже»

Моделирование многофазных течений в трубах носит важный прикладной характер в нефтегазовой отрасли. В частности, рассматриваются течения через штуцер. Штуцер широко используется для контроля расхода скважины и поддержания стабильного давления. При многофазном течении через штуцер может формироваться как критический так и докритический режимы течения. Во время критического режима расход через штуцер достигает своего максимального значения, а скорость смеси в узком сечении достигает скорости звука. В этом режиме уменьшение давления на выходе из штуцера не приводит к изменению давления на входе и общего расхода скважины.

В настоящее время для математического описания многофазных течений через штуцер существует несколько моделей [1-3]. Целью данной работы является внедрение аналитической модели штуцера в существующий прототип симулятора многофазных течений в скважинах и трубопроводах, основанный на модели дрейфа [4]. Модель дрейфа основана на упрощенном описании многофазного течения с помощью системы частных дифференциальных уравнений: одно уравнение закона сохранения импульса, записанного для смеси в целом, уравнения законов сохранения массы для фаз и алгебраические соотношения, связывающие скорости фаз. Для определения всех неизвестных характеристик течения в скважине используется алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, частично неявный метод для уравнений со связью по давлению) [5].

Первая часть исследования касалась докритической модели штуцера, которая хорошо описывает дозвуковые течения и выведена в предположении о несжимаемости

жидкости. Как показано на Рис. 1, штуцер создает дополнительный перепад давления, влияющий на распределение давления вдоль всей скважины.

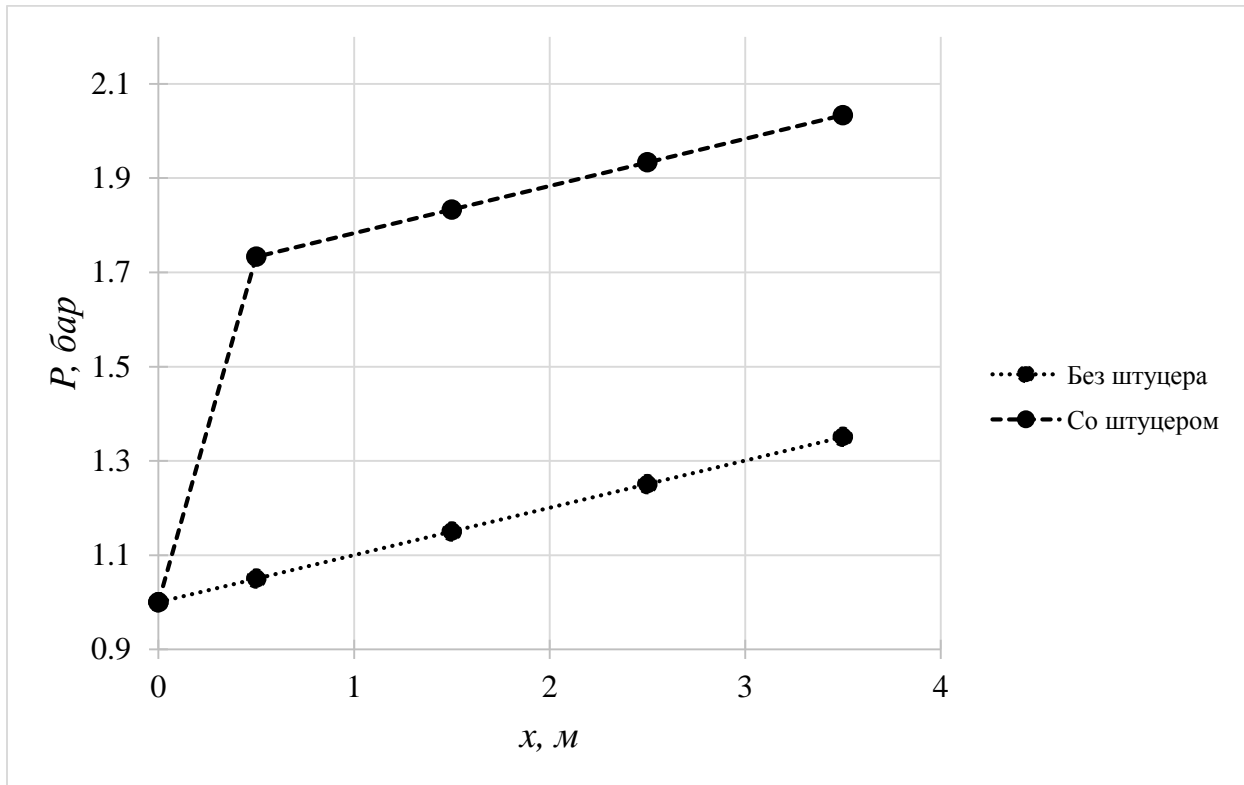


Рис. 1. Распределение давления вдоль скважины с учетом перепада давления, вызванного наличием штуцера и без учета этого перепада.

Вторая часть исследования заключалась в численном внедрении модели штуцера, позволяющей описать как критический, так и докритический режимы течения. Внедренная модель основана на работе [1] и позволяет независимо определять режим течения и описывать плавный переход от одного режима к другому. Критическое отношение давлений, при котором происходит этот переход определяется следующим образом:

$$y_c = \left(\frac{N}{D} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где k - отношение теплоемкостей газа C_p/C_v ; N - обозначение числителя, которое имеет вид:

$$N = \frac{k}{k-1} + \frac{(1-X_1)\rho_{g_1}(1-y)}{X_1\rho_L}$$

1 - индекс переменных, отвечающих за значения на входе в штуцер, 2 - индекс переменных, отвечающих за значения на выходе из штуцера; X - массовая доля газа; ρ_g - плотность газа; ρ_L - плотность жидкости. Выражение для знаменателя D вводится следующим образом:

$$D = \frac{k}{k-1} + \frac{n}{2} + \frac{n(1-X_1)\rho_{g_0}}{X_1\rho_L} + \frac{n}{2} \left[\frac{(1-X_1)\rho_{g_0}}{X_1\rho_L} \right]^2,$$

где $\rho_{g_0} = \rho_{g_1} y^{\frac{1}{k}}$; n - показатель политропы, который находится по формуле:

$$n = 1 + \frac{X_1(C_p - C_v)}{X_1C_v + (1-X_1)C_L},$$

где C_L - теплоемкость жидкости.

Проведен тестовый расчет для однофазного течения сжимаемого газа. Как показано на Рис. 2, в этом расчете явно видна граница перехода от критического к докритическому режиму течения через штуцер.

Данные модели имеют ряд допущений, такие как отсутствие трения и равенство фазовых скоростей. Дальнейшее развитие данной работы будет посвящено оценке влияния этих допущений на поведение модели.

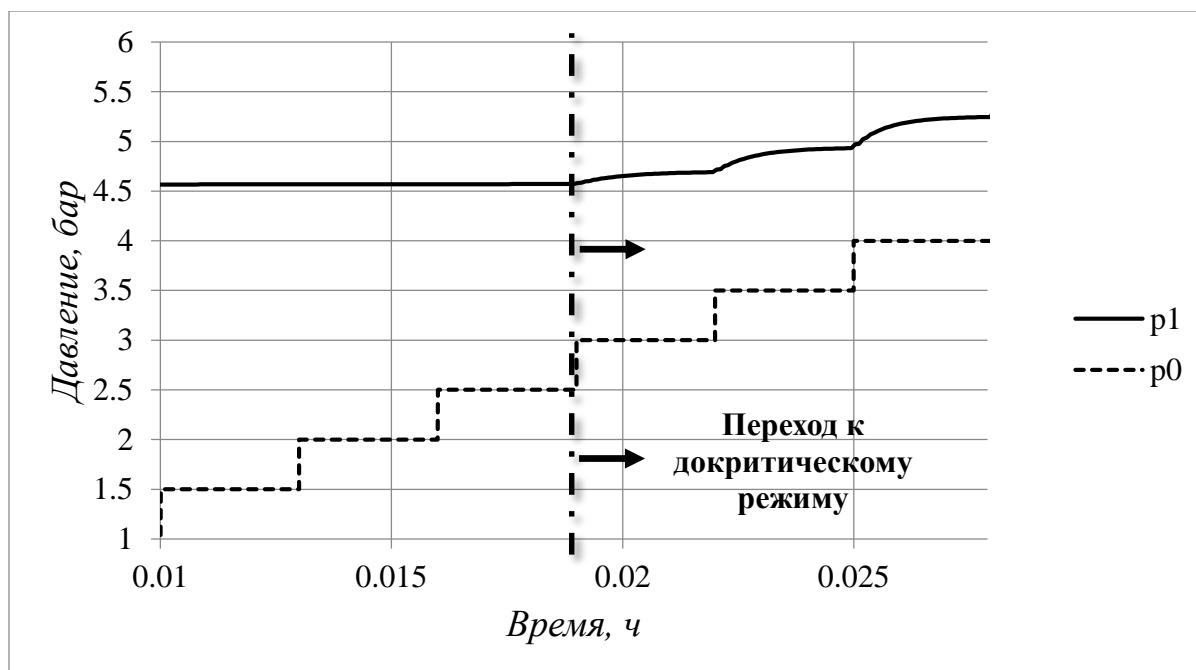


Рис. 2. Давление газа на входе в штуцер и на выходе из него с течением времени. p_0 – давление на выходе из штуцера, p_1 – давление на входе в штуцер.

Литература

1. Sachdeva R., Schmidt Z. Brill J.P., Blais R.M. Two-phase flow through the chokes. – The 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in New Orleans, LA, 1986.
2. Selmer-Olsen S., Holm H., Haugen K., Nilsen P. Subsea chokes as multiphase flowmeters. – London: Mechanical Engineering Publications, 1995.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. –3-е изд., 1992. – 672 с.
4. Shi H., Holmes J.A., Durlofsky L.J., Aziz K., Diaz L.R., Alkaya B., Oddie G. Drift-flux modeling of multiphase flow in wellbores. – SPE 84228, 2003.
5. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – London: Hemisphere publishing Co., 1980.