

Моделирование нестационарного течения азота по трубе колтюбинга

Водорезов Д.Д., аспирант кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», ТюмГНГУ

В настоящее время в нефтяной и газовой промышленности технология колтюбинга прочно заняла свое место. Сервисные операции, выполняемые с помощью данной технологии, оказывают минимальное негативное воздействие на нефтяные и газовые пласты в силу того, что могут без труда проводиться на депрессии. Для того чтобы определить величину депрессии на пласт используются различные забойные датчики, однако информация с них может быть получена только после извлечения на поверхность, что исключает возможность применения данной аппаратуры для оперативного контроля забойного давления во время проведения сервисных операций. А датчики, оборудованные каналом связи забоя с устьем, хоть и позволяют справиться с данной задачей, значительно повышают стоимость сервисных работ, что делает их применение также нецелесообразным.

Таким образом, наиболее оптимальным решением является определение величины забойного давления по показаниям датчика закачки азота на устье. Однако при таком подходе возникает вопрос информативности датчиков на устье. В силу того, что азот является сжимаемой средой, необходима оценка времени, в течение которого режим течения азота в трубе устанавливается и становится возможным расчет забойного давления по известным формулам гидравлики. Решение данной задачи возможно методами математического моделирования процесса нестационарного течения азота по трубе колтюбинга.

При разработке математической модели нестационарного неизотермического течения азота по трубе за основу был взят метод характеристик, описанный в работах [1-4].

Метод характеристик показывает лучшие результаты по сравнению с явными и неявными методами конечных разностей в силу лучшей сходимости и того, что способы задания граничных условий более универсальны и не требуют серьезных вмешательств в алгоритм [2]. Допущениями данной модели являются абсолютно жесткие стенки трубы колтюбинга, отсутствие участка трубопровода между азотной установкой и колтюбингом, течение жидкости в трубе на барабане принимается линейным, в то время как коэффициент трения Дарси-Вейсбаха рассчитывается с учетом нелинейного эффекта вторичного потока.

Нестационарное неизотермическое движение сжимаемой жидкости в трубе описывается следующей системой уравнений [2,3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t + u\rho_x + \rho u_x = 0 \\ \rho(u_t + uu_x) + (P_x) = \alpha \\ (P_t + uP_x) - a^2(\rho_t + u\rho_x) = \Psi \end{array} \right. \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \text{Уравнение} \\ \text{неразрывности} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{l} \text{Сохранение} \\ \text{импульса} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{l} \text{Сохранение} \\ \text{энергии} \end{array} \right) \end{array} \quad (1)$$

Где

$$\alpha = \rho g \sin \theta - \frac{f\rho u|u|}{2d}, \quad (2)$$

$$\Psi = (\gamma - 1)\left(q_h + \frac{f\rho u^2|u|}{2d}\right), \quad (3)$$

u – скорость течения жидкости, м/с, h – Относительная энтальпия, Дж/кг, a – скорость звука в газе, м/с, γ – показатель адиабаты, б.р., ρ – плотность, кг/м³, P – давление, Па, f – коэффициент трения, б.р., q_h – параметр теплопередачи /м³, d – диаметр трубы, м.

При этом необходимо отметить, что уравнение неразрывности в работе [2] выражено через энтальпию. В случае моделирования потока азота использование характеристики плотности среды более универсально, так как в этом случае слагаемое Ψ может быть выражено через показатель адиабаты, без привлечения функций энтропии и энтальпии. А в теоретически возможном температурном диапазоне газа при азотном освоении $\gamma = 1,4 \pm 0,001$.

После преобразования [3], уравнения системы 1 могут быть представлены в виде следующих уравнений характеристик:

$$d_0 P - a^2 d_0 \rho = \Psi d_0 t \quad \text{вдоль характеристики } \frac{d_0 t}{d_0 x} = \frac{1}{u} = \frac{1}{\lambda_0} \quad (4)$$

$$d_+ P + [\rho\alpha] d_+ u = [\Psi + a\alpha] d_+ t \quad \text{вдоль хар-ки } \frac{d_+ t}{d_+ x} = \frac{1}{u+a} = \frac{1}{\lambda_+} \quad (5)$$

$$d_- P - [\rho\alpha] d_- u = [\Psi - a\alpha] d_- t \quad \text{вдоль хар-ки } \frac{d_- t}{d_- x} = \frac{1}{u-a} = \frac{1}{\lambda_-} \quad (6)$$

Уравнения 5 и 6 представляют положительную и отрицательную характеристики соответственно. Данные характеристики отвечают за распространение волн расширения и сжатия. Также данные характеристики называются линиями Маха [1]. Уравнение 4 отвечает за движение газа. На координатной поверхности пространство-время характеристики выглядят как на рис.1[3].

Начальными условиями поставленной задачи являются параметры потока газа по всей длине течения в начальный момент времени. Расчетная сетка представлена на рис.2. Такой способ реализации метода характеристик называется методом с определенным временным шагом (method of specific time). Существует также метод характеристической сетки (method of specific grid), который более точен, однако накладывает некоторые ограничения на задание граничных условий.

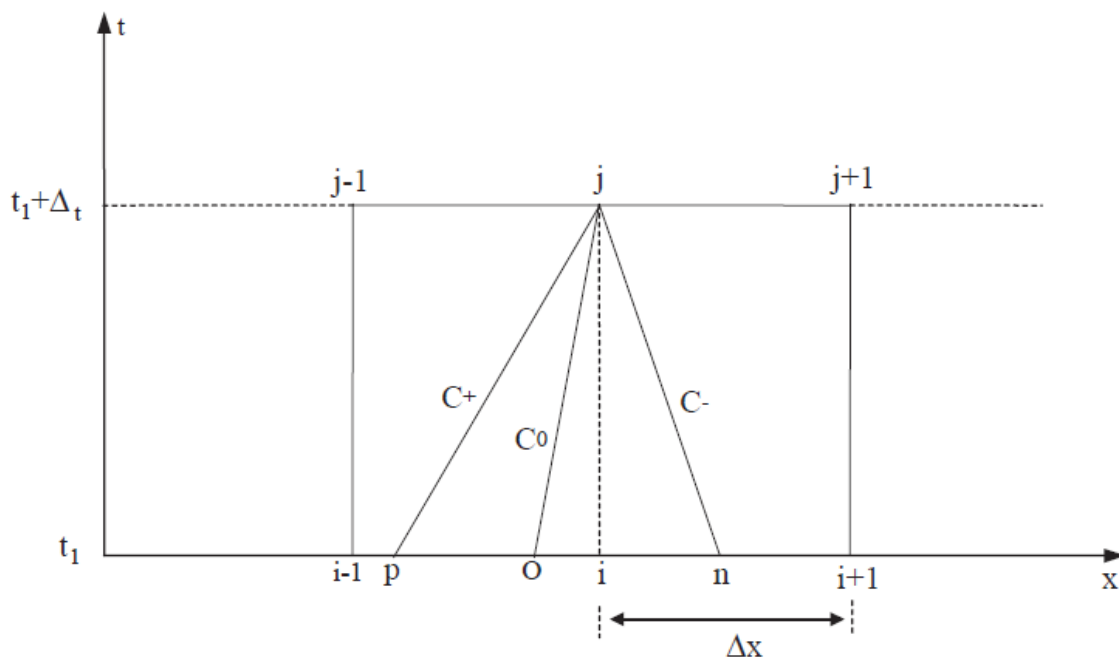


Рис.1. Линии характеристик в отдельной ячейке расчетной сетки

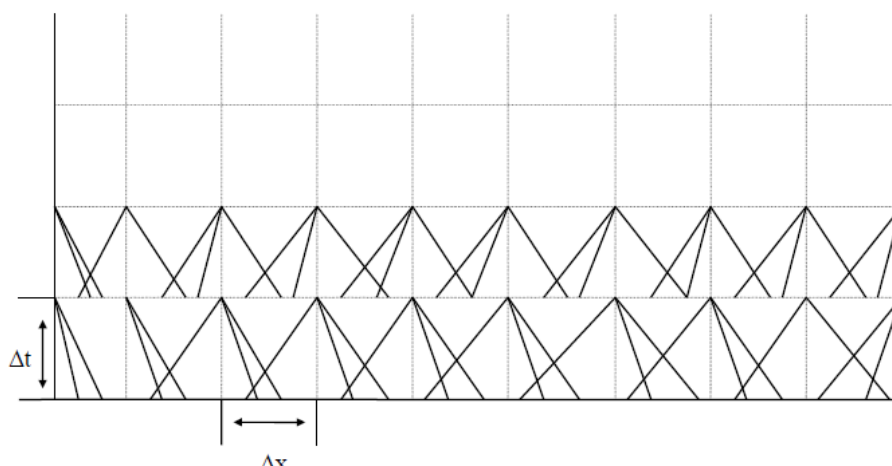


Рис.2.7. Расчетная сетка

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений 4-6 осуществляется с помощью метода конечных разностей. Алгоритм решения включает два основных этапа - этап предиктора и этап корректора. Этап предиктора заключается в отыскании параметров потока во всех узлах сетки на следующем временном шаге, но без учета погрешности, вызванной нелинейностью функций. На этапе корректора производится пересчет параметров в каждом узле сетки n -е количество раз, до тех пор, пока значения, полученные в предыдущей итерации корректора, не будут отличаться от значений текущей итерации на величину заданной погрешности.

При азотном освоении с применением колтюбинга, газ в трубу нагнетается компрессором. В литературе широко рассмотрены принципы моделирования методом характеристик нагнетания газа центробежными насосами [2,3], однако азотный компрессор является абсолютно иным по

принципу действия устройством и поэтому использование граничных условий для других типов насосов невозможно. При моделировании работы азотного компрессора были использованы следующие выводы:

1. Азотная установка может работать с постоянным массовым расходом азота G . Это обусловлено тем, что темп закачки регулируется темпом работы криогенных плунжеров, «холодных концов», таким образом, на массовый расход жидкого азота в теплообменник азотной установки не влияют сжимаемость газа, температура и давление.
2. Теплообменник, нагревающий жидкий азот до температуры порядка 285-300 К, обладает достаточной энергоемкостью, чтобы температура на выходе была постоянной.

Данные выводы позволяют принять температуру азота в начальном узле модели постоянной при неизменном расходе.

Другим граничным условием рассматриваемой задачи является точка обратного клапана на конце трубы колтюбинга. Обратный клапан, в точке которого находится крайний узел, предотвращает поток из скважины в трубу колтюбинга при превышении давления на забое скважины над давлением в трубе. Граничные условия на конце трубы различны в зависимости от скважинных условий, всего может существовать два случая:

1. Давление на забое $P_{заб}$ больше чем давление в трубе колтюбинга в точке обратного клапана P_k .
2. Давление на забое $P_{заб}$ равно или меньше давления в трубе колтюбинга в точке обратного клапана P_k .

Давление на забое может быть функцией от времени $P_{заб}(t)$, а может быть неизменным. Предлагаемая методика способна моделировать любые изменения забойных условий.

Ряд вычислительных экспериментов показал, что при моделировании течения газа по колтюбингу оптимальным шагом по времени является шаг в 0,5 с при пространственном шаге в 500 м. В таком случае удастся соблюсти достаточный запас для выполнения критерия Куранта при возможных изменениях u и a в широком диапазоне давлений и температур при оптимальных затратах вычислительной мощности ЭВМ.

Однако было также установлено, что при высокой нестационарности, которая выражена в резких скачках скорости потока, даже при соблюдении данного критерия решение некорректно. В работах [2-4] предлагается решить данную проблему внедрением неравномерной сетки по времени и координате [Nested Grid System], как показано на рис.3.

Такой подход несколько усложняет решение тем, что приходится отдельно добавлять в алгоритм функционал для перехода от одного размера ячеек к другому. Тем не менее, он рационален, так как позволяет значительно сэкономить вычислительные ресурсы и, соответственно, время на расчет модели.

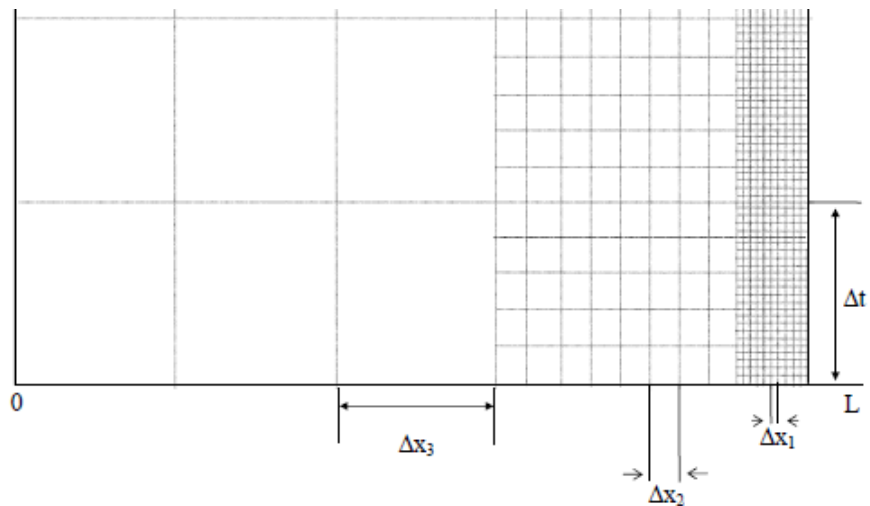


Рис.3. Неравномерная сетка по времени и координате [Nested Grid System][112]

На основании проведенных вычислительных экспериментов предлагается иной подход. Он основан на том наблюдении, что при явлениях высокой нестационарности при одномерном течении газа решающее значение имеет временной шаг, а не пространственный. Поэтому предлагается координатная сетка со следующей концепцией:

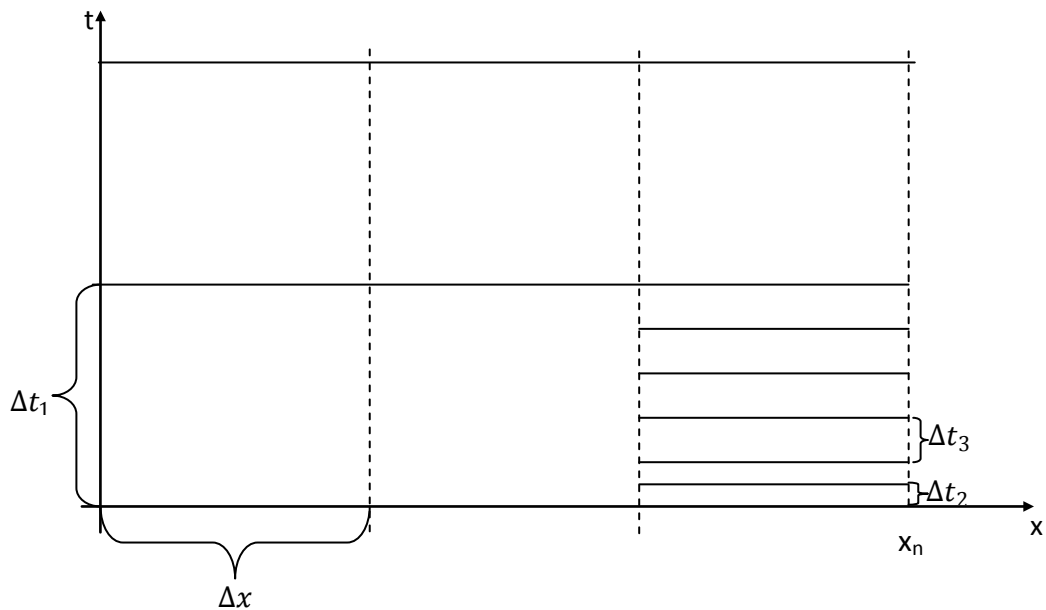


Рис.4. Модифицированная координатная плоскость

Как можно видеть из рисунка, шаг по пространственной координате постоянен, а шаг по временной координате переменный в окрестности узла x_n с высокой нестационарностью. Величина шага по времени в этом узле меняется, возрастая от момента нарушения стационарности, постепенно выравниваясь по величине с шагами по времени в других узлах по мере того, как скорости потока приближаются к относительно стационарным условиям.

Вычислительные эксперименты также показали, что при отрицательных скачках (2-й случай граничных условий на забое) давления на забое оптимальным начальным переменным шагом по времени является шаг

в 0,1 с. В то же время при росте давления на забое (1-й случай граничных условий на забое) шаг не обязательно делать переменным. При моделировании перехода азотного освоения с режима на режим шаг также может быть постоянным.

Результаты расчетов изменения давления в узле на устье показаны на рис.5. В начальный момент времени происходит скачек давления на забое на 2 МПа (1-й случай граничных условий на забое). Согласно результатам расчета, давление в узле на устье, где расположен датчик, данном случае будет отражать информацию о пластовом давлении с допустимой погрешностью в 5% через 210 с.

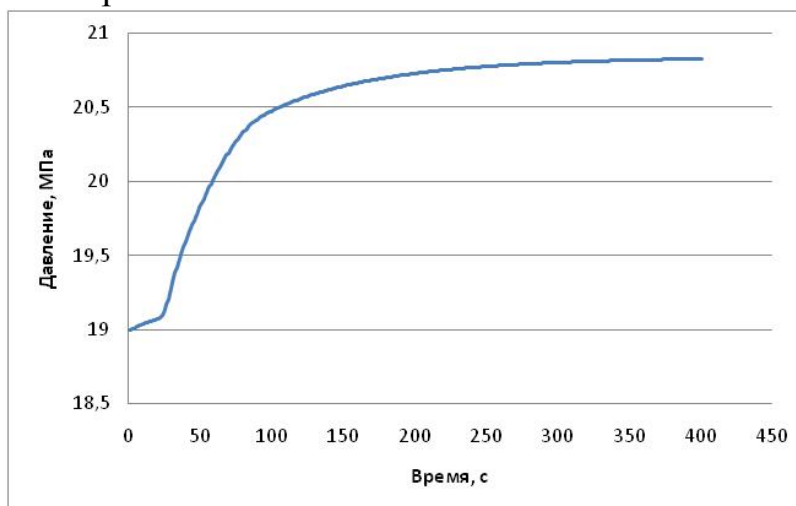


Рис.5. График давления от времени при изменении забойного давления. Через 400 с. с момента изменения забойных условий давление окончательно стабилизируется. На рис.6 показано сравнение расчета по уравнению Бернулли для установившегося режима и расчета методом характеристик в зоне установившегося режима.

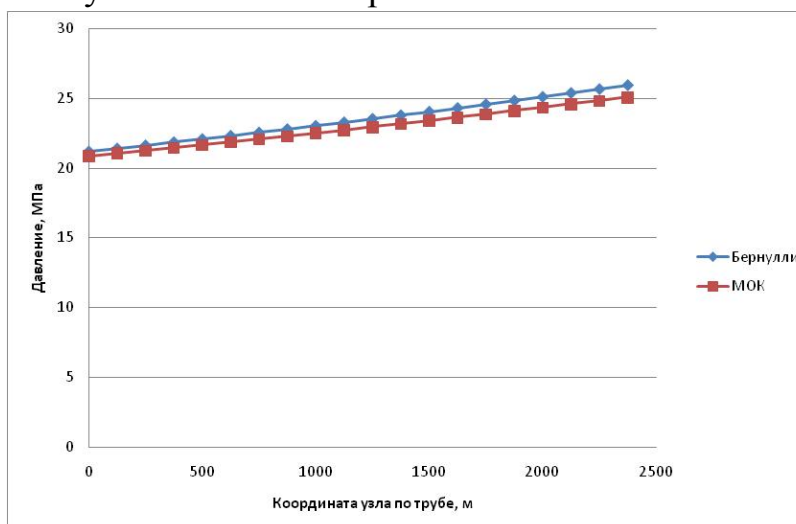


Рис.5. График давления от времени при изменении забойного давления. Незначительное отклонение результатов расчета по методу характеристик от результатов расчета по уравнению Бернулли, не превышающее 3,3 % позволяет судить о корректности разработанной модели.

Список литературы:

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика – М.: Наука, 1-2 том, 1991.
2. H. Mahgerefteh et al. A study of the dynamic response of emergency shutdown valves following full bore rupture of gas pipelines/ Trans IChemE, Vol 75, Part B, November 1997.
3. G.S. Denton CFD Simulation of Highly Transient Flows / A thesis submitted to University College London for the degree of Doctor of Philosophy/London, 2006.
4. E. Nourollahi Simulation of Gas Pipelines Leakage Using Modified Characteristics Method/ Transactions of the ASME/ Vol. 134, JUNE 2012.