

**SIMULATION PROCESS GAS FLOW
IN THE AREAS WITH PERFORATED PARTITION**

A. Dzh. Kartanova¹, S. M. Sulaimanova²

¹Kyrgyz State University construction, transport and architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyzstan,

²Kyrgyz Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan.

E-mail: a.kartanova@mail.ru; sulai@bk.ru

Key words: simulation, process, flow of gas, perforated partition, channel.

Abstract. The flow of pure gas is described in the nozzle with a perforated partition quasi-one-two-layer formulation. Partition modeled surface discontinuity for the gas parameters. The boundary conditions on such a surface obtained with additional assumptions within the models, in which the main attention is drawn to break porosity.

The existence of the gas flow through the perforation, the shock wave interaction with the surface, reflection and attenuation of the shock wave, its penetration through the perforation and the formation of inhomogeneous

regions for perforation - all these processes lead to unsteadiness and inhomogeneity of the flow structure near the perforated partition. In view of the considerable complexity of the flow in these areas is important to divide the flow region as a whole to the internal and external flow.

In many practical tasks the area of the inner region - an area with sophisticated effects – is much less than the characteristic size of the problem as a whole. Therefore, to solve the problem it is necessary to describe the interaction between external and internal flows using boundary conditions obtained in the study of the local structure of the flow in the areas near the perforated septum. These boundary conditions can be obtained, for example, solving the problem of the decay of a discontinuity when a shock wave on a perforated septum.

УДК 532.529 + 533.6.011

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ОБЛАСТЯХ С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

А. Дж. Картанова¹, С. М. Сулайманова²

¹Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова,
Бишкек, Кыргызстан,

²Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызстан

Ключевые слова: моделирование, процесс, течение газа, перфорированная перегородка, канал.

Аннотация. Рассматривается течение чистого газа в сопле с перфорированной перегородкой квази-однородной двухслойной постановке. Перегородку моделируем поверхностью разрыва для параметров газа. Граничные условия на такой поверхности получим с привлечением дополнительных предположений в рамках моделей, в которых главное внимание уделено разрывам пористости.

Существование расхода газа через перфорацию, взаимодействие ударной волны с поверхностью, отражение и затухание ударной волны, проникновение ее через перфорацию и образование неоднородных областей за перфорацией – все эти процессы приводят к нестационарности и неоднородности структуры течения вблизи перфорированной перегородки. Представляется важным разделить в целом сложную структуру потока в этих областях на внутренние и на внешние течения.

Во многих практических задачах размер внутренней области – области со сложнейшими эффектами, - намного меньше характерного размера задачи. Поэтому для решения задачи необходимо описать взаимодействия внешних и внутренних течений с помощью граничных условий, полученных при исследовании локальной структуры потока, в областях вблизи перфорированной перегородки. Такие граничные условия можно получить, например, решая задачу о распаде произвольного разрыва при падении ударной волны на перфорированную перегородку.

Введение. Одной из важнейших задач современной газовой динамики является задача о течении газа в областях с перфорированными перегородками, и примыкающие к ней задачи: сверхзвукового обтекания проницаемых тел, течения газа в каналах с внезапным изменением поперечного сечения и движения газа в каналах с внутренним телом и т.п. Необходимость построения метода расчета таких задач возникла из-за существующих трудностей в случаях обтекания непроницаемых поверхностей, например, при обтекании сверхзвуковым потоком газа, с ударными волнами, нестационарностью течения, а также проницаемость обтекаемого тела создает дополнительные сложности. Существование расхода газа через перфорацию, взаимодействие ударной волны с поверхностью, отражение и затухание ударной волны, проникновение ее через перфорацию и образование неоднородных областей за перфорацией – все эти процессы приводят к нестационарности и неоднородности структуры течения вблизи перфорированной перегородки. Представляется важным разделить в целом сложную структуру потока в этих областях на внутренние и на внешние течения.

Во многих практических задачах размер внутренней области – области со сложнейшими эффектами, - намного меньше характерного размера задачи. Поэтому для решения задачи необходимо описать взаимодействия внешних и внутренних течений с помощью граничных условий, полученных при исследовании локальной структуры потока, в областях вблизи перфорированной

перегородки. Такие граничные условия можно получить, например, решая задачу о распаде произвольного разрыва при падении ударной волны на перфорированную перегородку [1, 2].

При сверхзвуковых скоростях течения газа для стабилизации потока применяются перфорированные перегородки, поскольку с их помощью можно регулировать скорость и выравнять неравномерности потока. В аэродинамических конструкциях перфорированные тела используются в тормозных устройствах, а также последнее время такие перегородки в соплах применяются для гашения шумовых вибраций.

Обобщая сказанное, можно утверждать, что изучение процессов при движении идеального газа в областях с перфорированными перегородками представляет значительный и практический, и теоретический интерес.

Методы исследования

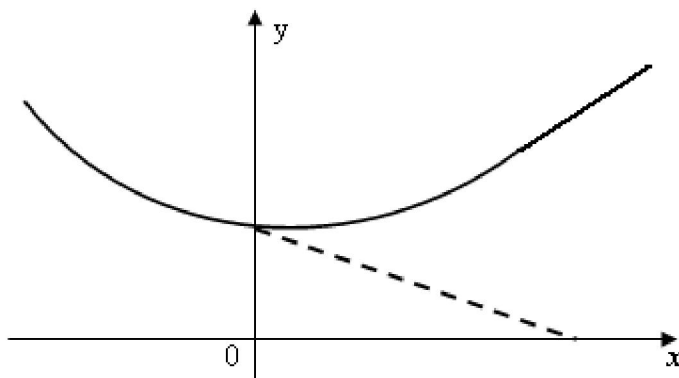
Рассмотрим течение чистого газа в сопле, площадь поперечного сечения которого $F(x)$ – известная функция продольной координаты x , отсчитываемой вдоль оси канала, с перфорированной перегородкой квазигомогенной двухслойной постановке. Перегородку моделируем поверхностью разрыва для параметров газа. Граничные условия на такой поверхности получим с привлечением дополнительных предположений в рамках моделей, описанных в [3], в которых главное внимание уделено разрывом пористости.

Поместим перфорированную перегородку в сопле, как показано на рисунке. Заметим, что в осесимметричном случае перегородка имеет форму обратного конуса, причем вершина конуса лежит на оси в расширяющейся части сопла. Ось x совпадает с направлением набегающего потока и с осями симметрии конуса и сопла, ось y ей перпендикулярна. Начало координат расположим в плоскости, где прикасаются два тела. Пусть u – x - компонента скорости потока, p – давление, ρ – плотность, e – удельная внутренняя энергия, i – удельная энтальпия, a – скорость звука, причем

$$e = e(p, \rho), \quad i = i(p, \rho) = e + p / \rho, \quad a = a(p, \rho), \quad (1.1)$$

где функции, стоящие справа, известны. Для совершенного газа с показателем адиабаты κ :

$$e = p / [(\kappa - 1)\rho], \quad i = \kappa p / [(\kappa - 1)\rho], \quad a = (\kappa p / \rho)^{1/2}.$$



Рисунок

Предположим, что $y'_s(x) < 1$, где $y_s(x)$ – уравнения образующей перегородки. Распределение параметров для нижнего слоя, т.е. для течения до перегородки удовлетворяют уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dx} &= \frac{1}{F(M^2 - 1)} \left[\frac{(1 + \nu)y_s^\nu g_m}{\rho} + u \frac{dF}{dx} \right]; \\ \frac{dp}{dx} &= -\frac{u}{F(M^2 - 1)} \left[(1 + \nu)y_s^\nu g_m + \rho u \frac{dF}{dx} \right]; \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{1}{a^2} \frac{dp}{dx}.$$

Здесь g_m - расход газа через перфорированную перегородку; M - число Маха.

Введем отмеченные чертой вверху переменные для обозначения соответствующих параметров для верхнего слоя. Величинами с индексом m обозначим соответствующие параметры газа в перфорированной перегородке. Тогда, система уравнений, описывающая течение за перегородкой имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{u}}{dx} &= \frac{\bar{u}}{\bar{\rho}\bar{F}(\bar{M}^2 - 1)} \left[(1+\nu)y_s^v g_m (1 + \bar{M}^2 + \rho_s(\bar{S} - S_m)) - \bar{\rho}\bar{u} \frac{d\bar{u}}{dx} \right]; \\ \frac{d\bar{p}}{dx} &= \frac{\bar{u}}{\bar{\rho}\bar{F}(\bar{M}^2 - 1)} \left[(1+\nu)y_s^v g_m (2\bar{\rho} + \bar{\rho}_s(\bar{S} - S_m)) - \bar{u}\bar{\rho}^2 \frac{d\bar{F}}{dx} \right], \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $\bar{\rho} = Q_0 / \bar{u}\bar{F}$; $\bar{\rho}_s = \partial\bar{\rho} / \partial S = -\frac{\kappa-1}{\kappa}\bar{\rho}$; $S = p / \rho^\kappa$ - энтропийная функция; Q_0 - расход газа в начальном сечении. В выписанных уравнениях $\nu=0$ и 1 для плоского и осесимметричного случаев, соответственно.

Для выяснения характерных особенностей течения вблизи точки «схода» перфорированной перегородки поступим следующим образом. При малых $\Delta p = p - \bar{p}$ расход газа через перегородку $g_m = C\Delta p$, где C - известная константа.

Допустим, что

$$\Delta p = \pi x^\alpha, \quad (1.4)$$

которая отсчитывается от точки «схода». Тогда

$$\bar{F}(x) = \bar{\chi}x^2; \quad F(x) = F_0 + \chi x; \quad \bar{u} = \omega x^\beta,$$

где $\bar{\chi}$ и χ - известные константы, а π и ω вместе с α и β нужно найти. В силу (1.4) $g_m = C\pi x^\alpha$, согласно этому из (1.3) при малых x имеет место

$$\begin{aligned} p' &= \frac{dp}{dx} = -\frac{\rho_0 u_0 F_0'}{F_0(M_0^2 - 1)} \equiv p_0'; \\ \bar{u}' &= \frac{d\bar{u}}{dx} = -\frac{(1+\nu)y_s^v g_m}{F_0(M_0^2 - 1)} - \frac{p'}{\bar{\rho}\bar{u}}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Подставим (1.4) в (1.3) и (1.5), предварительно переписав в форме:

$$\begin{aligned} -\bar{p}' + p_0' - p_0' &= \frac{-\bar{u}}{\bar{\rho}\bar{F}(\bar{M}^2 - 1)} \left[(1+\nu)y_s^v g_m (2\bar{\rho} + \bar{\rho}_s(\bar{S} - S_m)) - \bar{u}\bar{\rho}^2 \frac{d\bar{F}}{dx} \right], \\ \Delta p' - p_0' &= \frac{-\bar{u}}{\bar{F}(\bar{M}^2 - 1)} \left[(1+\nu)y_s^v g_m \left(2 - \frac{\kappa}{\kappa-1}(\bar{S} - S_m)\right) - \bar{u}\bar{\rho}\bar{F}' \right]. \end{aligned}$$

С учетом малости $\bar{S} - S_m$ и \bar{M}^2 из (1.3), получим:

$$\begin{aligned} \pi\alpha x^{\alpha-1} - p_0' &= \omega x^\beta \frac{\omega x^\beta \bar{\rho}^2 \bar{\chi} \cdot 2x - (1+\nu)y_s^v C\pi x^\alpha \cdot 2\bar{\rho}}{\bar{\rho}\bar{\chi}x^2(-1)}, \\ \bar{\chi}\pi\alpha x^{\alpha+1} - \bar{\chi}p_0'x^2 &= 2(1+\nu)y_s^v C\pi\alpha x^{\beta+\alpha} - 2\omega^2 \bar{\rho}\bar{\chi}x^{2\beta+1}, \end{aligned}$$

а из второго уравнения (1.3):

$$\omega\beta x^{\beta-1} = -\frac{(1+\nu)y_s^v C\pi x^\alpha}{\bar{\rho}\bar{\chi}x^2} + \frac{\Delta p' - p_0'}{\bar{\rho}\omega x^\beta} = \frac{(1+\nu)y_s^v C\pi x^\alpha}{\bar{\rho}\bar{\chi}x^2} + \frac{\pi\alpha x^{\alpha-1} - p_0'}{\bar{\rho}\omega x^\beta},$$

откуда получим

$$\overline{\rho\chi}\omega^2\beta x^{2\beta+1} = (1+\nu)y_s^v C\pi\omega x^{\beta+\alpha} + \pi\alpha\overline{\chi}x^{\alpha+1} - p'_0\overline{\chi}x^2.$$

Перепишем полученные соотношения:

$$\pi\alpha\overline{\chi}x^{\alpha+1} - p'_0\overline{\chi}x^2 = 2(1+\nu)y_s^v C\pi\omega x^{\beta+\alpha} - 2\overline{\rho\chi}\omega^2\beta x^{2\beta+1};$$

$$\overline{\rho\chi}\omega^2\beta x^{2\beta+1} = (1+\nu)y_s^v C\pi\omega x^{\beta+\alpha} + \pi\alpha\overline{\chi}x^{\alpha+1} - p'_0\overline{\chi}x^2. \quad (1.6)$$

Из этих уравнений можно найти показатели степени α и β , и константы ω и π . Заметим, что в (1.6) четыре показателя степени: $\alpha+1$, 2 , $\beta+\alpha$ и $2\beta+1$. В общем случае за счет выбора двух чисел (α и β) их невозможно сделать одинаковыми. Поэтому решением следует считать такие α и β , при которых оставшаяся степень имеет более высокий порядок. Имеется несколько возможностей:

1) $\alpha+1 = \beta+\alpha = 2\beta+1$; $\alpha = 2\beta \rightarrow 2\beta+1 = 3\beta \rightarrow \beta=1$, $\alpha = 2 \rightarrow \alpha+1 = 3 > 2$, и, следовательно, этот случай не подходит.

2) $\alpha+1 = \beta+\alpha = 2 \rightarrow \alpha=1$, $\beta=1$, а $2\beta+1 = 3 > 2$, тоже не подходит.

Далее, ω и π должны удовлетворять уравнениям (1.6), т.е.

$$\overline{\chi}\pi - \overline{\chi}p'_0 = 2(\nu+1)y_s^v C\pi\omega;$$

$$-(1+\nu)y_s^v C\omega\pi + \pi\overline{\chi} - \overline{\chi}p'_0 = 0;$$

$$\overline{\chi}\pi - \overline{\chi}p'_0 = (1+\nu)y_s^v C\omega\pi + \pi\overline{\chi} - \overline{\chi}p'_0.$$

Отсюда следует, что $\omega = 0$. Если $\omega = 0$, то $\pi = p'_0$ если $\pi = 0$, то равенство невозможно.

3) $\alpha+1 = 2\beta+1 = 2 \rightarrow \alpha=1$, $\beta = \frac{1}{2}$, $\beta+\alpha = \frac{3}{2} < 2$, тогда $\beta+\alpha = \frac{3}{2} < 2$ тоже не подходит.

Уравнения для ω и π имеют вид:

$$\overline{\chi}\pi - \overline{\chi}p'_0 = -2\omega^2\overline{\rho\chi};$$

$$\frac{1}{2}\overline{\rho\chi}\omega^2 = \pi\overline{\chi} - p'_0\overline{\chi}.$$

Из этих уравнений находим, что $\omega^2 = 0$, $p'_0 = \pi$.

Итак, случаи 2) и 3) дают одинаковый результат, который к тому же неприемлем (чтобы было течение через перфорацию должно быть $\pi > 0$, а $p'_0 < 0$).

Пусть имеет место (1.4) и еще

$$\overline{u} = \omega x^\beta, \quad F = F_0 + \chi x, \quad \overline{F} = \overline{F}_0 + \overline{\chi}x. \quad (1.7)$$

Подставляя (1.4) и (1.7) в уравнение (1.3) получим для ω и β, α, π - по прежнему следующие значения $\pi = p'_0$, $\omega^2 = 0$. Теперь предположим, что кроме (1.7) имеет место $g_m = C \cdot \Delta P_0 \equiv g_{n0} \neq 0$.

Вновь обратимся к уравнениям (1.3)

$$\alpha\pi x^{\alpha-1} - p'_0 = 2\omega(1+\nu)y_s^v g_{n0} \frac{1}{F_0} x^\beta - \omega^2 \overline{\rho\chi} x^{2\beta} \frac{1}{F_0};$$

$$\omega^2 \overline{\rho\chi} x^{2\beta-1} = -(1+\nu) \frac{y_s^v g_{n0} \omega}{F_0} x^\beta + \alpha\pi x^{\alpha-1} - p'_0.$$

Здесь показатели степени: $\alpha - 1$, 0 , β , 2β , $\beta - 1$. Возможны следующие случаи: $2\beta - 1 = 0, \alpha - 1 = 0 \rightarrow \beta = \frac{1}{2}, \alpha = 1, 2\beta - 1 > 0$ и $\beta = \frac{1}{2} > 0$, откуда: $\pi = p'_0$ и $\omega = 0$.

Итак, для любого \bar{F}_0 нужно подобрать такое g_{n0} , чтобы, несмотря на начальное уменьшение перепада Δp_0 , он не стал нулевым. Еще проще с самого начала подобрать g_{n0} из условия $\Delta p_0 = 0$.

В качестве произвольных параметров при сквозном интегрировании, где внутри интервала интегрирования имеются седловидные особенности, служат параметры u_0 и \bar{F}_0 для верхнего слоя.

\bar{F}_0 – характеризует величину зоны отрыва на верхнем слое.

Результаты исследования

С целью определения параметров газа в перфорированной перегородке, сформулируем граничные соотношения на поверхности разрыва и подробно остановимся на локальной структуре течения газа в окрестности перегородки. Основные граничные условия на разрыве имеют вид:

$$[\rho u] = 0; \quad [2I + V^2] = 0; \quad [p + \rho u^2] = -X; \quad [\rho uv] = -Y; \quad [\rho uw] = -Z. \quad (2.1)$$

Здесь, как и по прежнему p – давление, ρ – плотность, I – удельная энтальпия, u, v, w – нормальная и поперечные компоненты вектора скорости V , $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ и $[\varphi] = \varphi_+ - \varphi_-$. Параметрам потока слева от перегородки приписан индекс минус, справа – плюс, а величинами, средним по минимальным сечениям проходящих отверстий перегородки – индекс m . X, Y, Z – компоненты силы \mathbf{F} , действующей со стороны потока на единицу площади перегородки. При рассмотрении течения в целом толщиной перегородки и характерным линейным размером перфорации d можно пренебречь.

Наряду с основными соотношениями (2.1) необходимы дополнительные выражения для \mathbf{F} , которые связаны со структурой локального течения через перфорацию.

В случае “густых” перегородок, длина каналов которых велика по сравнению с их поперечными размерами, можно принять равенства:

$$v_m = v_+ = 0, \quad w_m = w_+ = 0. \quad (2.2)$$

Эти условия можно использовать для определения Y и Z .

Выводы. Авторы [1,3] считают, что вместо задания X проще и удобнее постулировать ту или иную схему перетекания газа через перегородку. При дозвуковом потоке слева от перегородки, поджатие газа сопровождающее падением давления происходит изоэнтропически т.е.

$$S_- = S_m. \quad (2.3)$$

Здесь S – удельная энтропия или любая ее функция. Равенства (2.1), (2.2) вместе с (2.3) и отношениями:

$$f\rho_m u_m = \rho_- u_-, \quad 2I_m + u_m^2 = 2I_- + V_-^2. \quad (2.4)$$

и уравнениями состояния $I = I(p, \rho)$ и $S = S(p, \rho)$ представляют систему условий, связывающих параметрами слева от перегородки и в ее минимальном сечении, где $f = \sum_m / \sum$ – степень поджатия перфорации.

На режиме p1, в которой $M_m < 1$, используется известная схема отрывного истечения (удар Борда), когда на перегородку справа действует постоянное давление $p = p_m$. На данном этапе предполагается, что каналы перфорации в направлении течения либо сужаются, либо имеют постоянные поперечные сечения.

Третье уравнение (2.1) на режиме p1 принимает вид

$$p_+ + \rho_+ u_+^2 = p_m + f\rho_m u_m^2 \quad (2.5)$$

На данном режиме параметры, входящие в (2.1)–(2.5), находятся одновременно с решением всей задачи о распаде разрыва [1, 4].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гринь В.Т., Крайко А.Н., Миллер Л.Г. К распаду произвольного разрыва на перфорированной перегородке // ПИМТФ. – 1981. – № 3. – С. 96-106.
- [2] Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной собственного давления // Прикладная математика и механика. – 1979. – Т. 43, № 3. – С. 500-510.
- [3] Крайко А.Н., Миллер Л.Г., Ширковский И.А. О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости // Прикладная механика и техническая физика. – 1982. – № 1. – С. 111-118.
- [4] Газовая динамика. Избранное. В 2 т. – Т. 1 / Под общей ред. А. Н. Крайко. Ред.-сост. А.Н. Крайко, А.Б. Ватажин, А.Н. Секундов. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 720 с. – ISBN 5-9221-0651-1.
- [5] Крайко А.Н., Сулайманова С.М. К двухжидкостные течения смеси газа и твердых частиц с «пеленами» и «шнурами», возникающими при обтекании непроницаемых поверхностей // ПИММ. – 1983. – Т. 47, вып. 4. – С. 619-630.

REFERENCES

- [1] Grin V., Kraiko A., Miller L. To disintegration of the arbitrary break on the perforated partition. *Applied Mechanics and Technical Physics*, 1981, N 3, pp. 96-106. (in Russ.)
- [2] Kraiko A.N. About the Surfaces of Discontinuity in a Medium Devoid of Its Own Pressure [O poverkhnostyakh razryva v srede, lishennoy sobstvennogo davleniya]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1979, vol. 43, N 3, pp. 500-510. (in Russ.)
- [3] Kraiko A.N., Miller L.G., Shirkovskiy I.A. About Gas Flow in Porous Media with Surfaces of Porosity Discontinuity [O techeniyakh gaza v poristoy srede s poverkhnostyami razryva poristosti]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1982, N 1, pp. 111-118. (in Russ.)
- [4] Gas Dynamics. Selected. In 2t. vol.1, Ed. A.N.Kraiko. Ed-comp. A.N. Kraiko, A.B. Vatazhin, A.N. Secundov. -2-ed., rev. -M.: FIZMATLIT, 2005-720c. -ISBN 5-9221-0651-1. (in Russ.)
- [5] Kraiko A.N., Sulaimanova S.M. Two-Fluid Flows Mixture of Gas and Solid Particles with the "Sheets" and "Filaments" that Arise when Flow Impermeable Surfaces [Dvuzhikhkostnyye techeniya smesi gaza i tverdykh chastits s pelenami i "shnurami", vznikayushhimi pri obtekanii neproniцаemykh poverkhnostey]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1983, vol. 47, N 4, pp. 619-630. (in Russ.)

ПЕРФОРАЦИЯ ЛАНҒАН ҚАЛҚАНЫҢ АУДАНДАРДА
ГАЗ АҒЫНЫ ПРОЦЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

А. Дж. Карганова¹, С. М. Сулайманова²

¹Н. Исанов атындағы Қырғыз мемлекеттік университеті құрылыс, көлік және сәулет, Бішкек, Қырғызстан,
²Қырғыз Ресей Славян университеті, Бішкек, Қырғызстан

Тірек сөздер: модельдеу, процесс, газ ағыны, перфорацияланған бөлім, арна.

Аннотация. Таза газ ағыны перфорацияланған бөлімі квазимемлекеттік бір-екі қабатты тұжырымы шашатын сипатталған. Бөлімді газ параметрлер үшін беті алшақтық модельденген. Негізгі назар кеуектілігі сынған жасалады, онда модельдер ішінде қосымша жорамалдар, алынған осындай бетіндегі шекаралық шарттар.

Тесіктері және перфорацияның үшін біртекті аймақтарда қалыптастыру арқылы перфорацияның арқылы газ ағыны, соққы толқынының бетінің, рефлексия және өшу соққы толқындар өзара іс-қимыл, оның ену болуы - барлық осы процестер тұрақсыздығы және біртегіс әкелуі перфорацияланған бөлімнен жақын ағыны құрылымы. Осы салаларда ағынының айтарлықтай күрделілігіне ескере ішкі және сыртқы ағынына тұтастай ағынының аймақты бөлуге маңызды болып табылады.

Көптеген практикалық міндеттерді жылы ішкі облысының аумағы - күрделі әсерлері бар алаңы - тұтастай мәселені тән мөлшері әлдеқайда аз. Сондықтан, мәселені шешу үшін ол перфорацияланған қалқалар жақын аудандарда ағынының жергілікті құрылымын зерттеуге алынған шекаралық шарттарын пайдалана отырып, сыртқы және ішкі ағындарының арасындағы өзара іс-қимылды сипаттау қажет. Бұл шекаралық шарттар перфорацияланған қалқалар туралы алшақтықты кезде соққы толқынының ыдырауы проблемасын шешу, мысалы, алуға болады.

Поступила 22.05.2015 г.