

УДК 517.9+62-503.55

Математическое моделирование и оптимизация процесса отбора пробы среды буровым роботом-информатором в экстремальных условиях Марса

А. А. Цокуренко

Херсонський державний технічний університет

Надійшла до редакції 01.10.98

Робота містить в собі постановку задачі розрахунку руху сипучого середовища в пристрої з складною геометрією та її розв'язання методами імітаційного моделювання і кінцевих елементів. Математична модель середовища розглядається як в'язко-пластична і містить фізичні та геометричні нелінійності, які зумовлюють поведінку середовища як рідини, так і твердого тіла. Задача розглянута в розтині оптимізації функціональних характеристик, які обумовлюють процес. Отримано принципово нові результати і залежності. Алгоритми оптимізації пройшли успішну апробацію в наукових космічних експериментах.

Основные задачи робота-информатора в ходе бурового космического эксперимента, состоят в интерпретации и идентификации свойств объекта по косвенным данным. Кроме того, решению подлежат задачи:

- отбора пробы грунта в виде сыпучей буровой мелочи в керноприемную полость грунтозаборного устройства (ГЗУ);
- сохранение структурного строения и стратификации пробы.

Отбираемая проба, согласно требованиям последующего химического флюоресцентного анализа в бортовой лаборатории, должна иметь фракционный состав с размерами частиц сыпучей смеси $d < 100$ мкм. Такая среда обладает известными физико-механическими свойствами, что позволяет смоделировать динамику среды в ГЗУ и выбрать такие функциональные характеристики бурового робота-информатора (БРИ), которые оптимизируют скоро-

сть отбираемой пробы Q и степень ее перемешиваемости δ .

Среда при ее взаимодействии со стенками полости ГЗУ и шнекового транспортера, может в зависимости от условий напряженного состояния в рассматриваемой точке проявлять вязкостно-пластические свойства [4]. При достижении в ней некоторого предельного напряжения сдвига τ_0 возникает текучее состояние среды [2]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \delta \varepsilon / \delta \tau, \quad \tau > \tau_0. \quad (1)$$

При $\tau < \tau_0$ среда ведет себя как твердое тело [4], так как $\delta \varepsilon / \delta \tau = 0$. Напряженное состояние течения среды характеризуется тензором напряжений τ_{ij} и тензором деформаций ε_{ij} , которые в зависимости от условий нагружения и их значений описывают различное состояние (гидродинамическое, твердого вязко-пластического тела) среды. Конкретные зна-

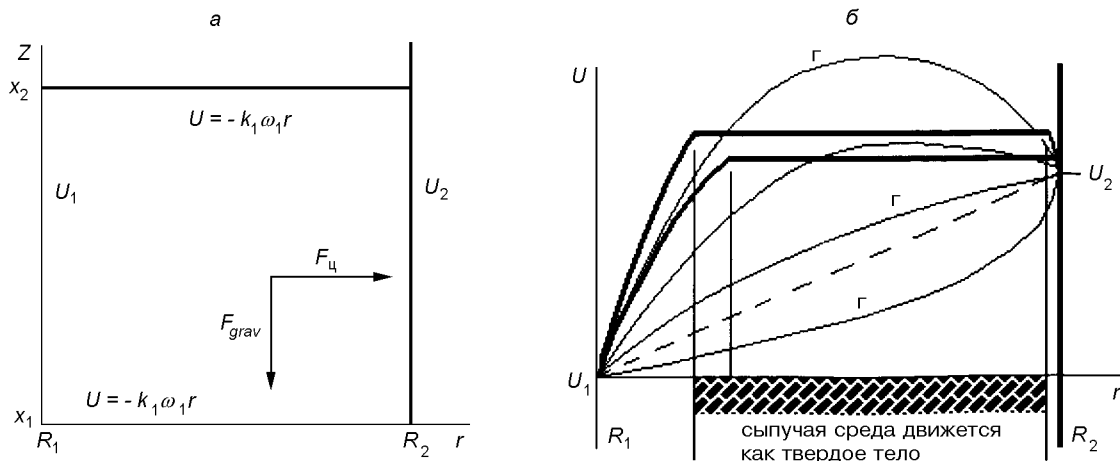


Рис. 1. Задача отбора сыпучей среды с помощью ГЗУ: а — граничные условия, соответствующие различным значениям режимных параметров; б — сравнение решений гидродинамической модели (тонкие линии) и вязко-пластической модели (1) (жирные линии)

чения параметров, входящих в (1), определялись на основе методики [5] по аналогам, рекомендованным ГЕОХИ им. В. И. Вернадского АН СССР:

$$\mu = 4.85 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{М}^2; \quad \tau_0 = 3.5 \cdot 10^4 \text{ Н}/\text{М}^2.$$

На среду действуют массовые силы ρg , силы поверхностного взаимодействия на контактах «среда—ГЗУ» и создаваемый на груди забоя подпор давления P . Изменяя значения режимных параметров работы БРИ и ГЗУ (рис. 1, а), можно реализовать различные (в рамках допустимого диапазона) режимы движения отбираемой пробы грунта в керноприемной полости ГЗУ (рис. 1, б).

Процесс движения сыпучей среды зависит от целого ряда параметров: угловых скоростей вращения ω_1 и ω_2 , развиваемых на шнековом транспортере и рабочем органе (РО), скорости подачи РО V , параметров среды ρ , φ_{in} , μ , τ_0 , конструктивных параметров ГЗУ, в частности угла наклона реборды α , коэффициентов трения k_1 и k_2 на контактах «среда—реборда ГЗУ» и «среда—внутренняя полость ГЗУ», гравитации G и некоторых других параметров, влияние которых принципиально не может быть учтено в лабораторных условиях. В силу этого исследование допустимых решений сформулированной задачи возможно только при комплексном использовании математического моделирования и натурального эксперимента.

В основу исследования процесса был положен метод имитационного моделирования на ЭВМ (программа KERN, метод конечных элементов [3]) совместно с натурными экспериментами. Этот подход позволил уже на первом этапе исследований

уточнить математическую модель процесса с помощью моделирования механизма очистки скважины [5].

Моделирование работы ГЗУ выполнено для условий стационарного (квазистационарного) режима. Последнее условие позволяет рассматривать модель движения сыпучей среды в сечении окна шнекового транспортера, предполагая ее движение в ГЗУ вдоль координаты, направленной по реборде (рис. 1, а). Тогда движение среды со скоростью $U(r, z)$ можно представить как однородное в цилиндрической системе координат (r, Z) в виде

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} (U/x) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\text{grad} P}{\mu \rho}, \quad (2)$$

где P — давление отбираемой ГЗУ среды, развиваемое на груди забоя, т. н. давление подпора. При этом (2) удовлетворяет реологическим условиям текучести среды:

$$\frac{\partial U_i}{\partial z_j} \tau = \tau_0 + \mu(p), \quad i, j = 1, 2, \quad (3)$$

с граничными условиями (рис. 1)

$$\begin{aligned} U_1 &= k_1 R_1 \omega_1, & U_2 &= k_2 R_2 \omega_2 & \text{при } z \in (z_1, z_2), \\ U_1 &= k_1 r \omega_1 & & & \text{при } r \in (R_1, R_2), \quad z = z_1, z_2 \end{aligned} \quad (4)$$

при различных значениях параметров ω_1 , ω_2 , α , ρ , φ_{in} , μ , τ_0 , V , k_1 , k_2 , G [1]. Здесь индексами 1 и 2 обозначены параметры транспортера ГЗУ и РО БРИ соответственно.

На основании анализа реализации возможных видов движения среды в керноприемной полости

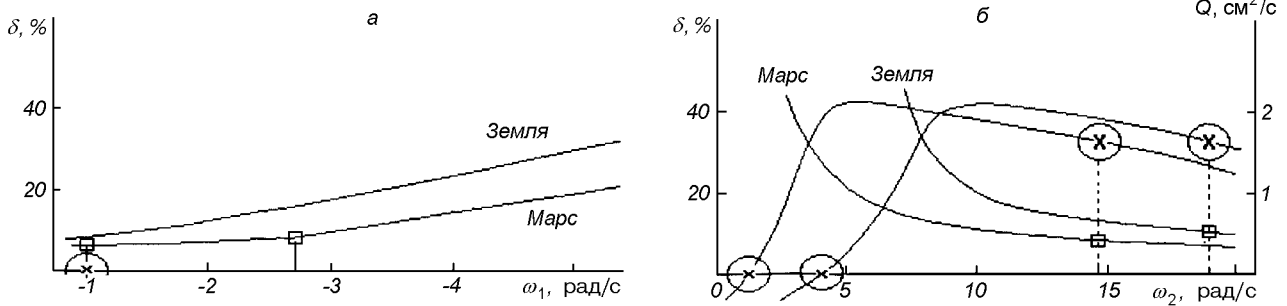


Рис. 2. Значения Q и δ в различных условиях гравитации: а — от ω_1 ; б — от ω_2 . Параметрами без штрихов отмечены зависимости, полученные для земных условий, со штрихами — для условий гравитации Марса

был сформулирован критерий K_{st} оценки степени сохранения структуры и стратификации пробы грунта в виде сыпучей буровой мелочи. Он определяется как отношение установившихся потоков среды в положительном и отрицательном направлениях ее движения, где за положительное направление принято направление забора [5]:

$$K_{st} = \frac{Q^-}{Q^+} = -\frac{\int_{S^-} U^-(r, z) dS}{\int_{S^+} U^+(r, z) dS}, \quad \delta \equiv K_{st}, \quad (5)$$

где $S^+ + S^- = (z_2 - z_1)(R_2 - R_1)$, $U^- \equiv U$ при $U \leq 0$; $U^+ \equiv U$ при $U > 0$; S — сечение окна шнекового транспортера.

При варьировании параметров [1]: ω_1 , ω_2 , V , n_z , g были получены величины, позволяющие количественно характеризовать динамику движения сыпучей среды в керноприемной полости ГЗУ: высота столба отбираемой пробы W , скорость потока среды Q и степень ее перемешиваемости δ для различных конструкций ГЗУ, определяемые количеством реборд n_z и условиями гравитации g . Расчеты показали (рис. 1, б), существенное различие решений для гидродинамической и вязко-пластической [2] моделей при тех же значениях исходных данных. На рис. 2, а приведена характерная картина динамики забора сыпучей среды и коэффициента перемешиваемости при соотношении угловых скоростей вращения РО и транспортера ГЗУ:

$$|- \omega_1 / \omega_2| \approx 1, \quad \omega_1 < 0, \quad \omega_2 > 0, \quad \omega_2 = 6 \text{ рад/с.}$$

Как показали исследования, при изменении ω_1 от -1 рад/с до 6 рад/с наблюдается эффект «запирания» керноприемной полости, который характеризуется резким уменьшением величины забора Q сыпучей среды. Для земных условий, $g = 9.87 \text{ м/с}^2$, этот эффект имеет место при значениях режимных

параметров $\omega_1 \approx -3 \text{ рад/с}$, в то время как для условий Марса

$$g = 3.72 \text{ м/с}^2, \quad \omega_1 \approx -5 \text{ рад/с.}$$

В расчетах (рис. 2, а) представлены результаты, описывающие однозаходный шнековый механизм ГЗУ, $n_z = 1$, при значениях остальных параметров: $\omega_2 = 5 \text{ рад/с}$; $V = 1 \dots 0.009 \text{ м/с}$; $k_1 = 0.05$; $\alpha = 5^\circ \dots 35^\circ$; $k_2 = 0.05 \dots 0.3$.

Характер кривых на рис. 2, б позволяет наглядно представить эффект «запирания» при критическом соотношении угловых скоростей вращения РО и ГЗУ. При уменьшении ω_2 значение Q после небольшого увеличения, объясняющегося уменьшением отбора шлама при очистке скважины и соответственно увеличением подпора давления на груди забоя, резко уменьшается, что соответствует конкретным значениям ω_2 (отмечено на графике).

Режимы забора среды, соответствующие величине столба керна, равного глубине бурения ($W = 1$), принятого согласно требованиям НКЭ за оптимальный, при минимуме значений показателя перемешиваемости δ отмечены на графике, а их значения равны: $\omega_2 = 19 \text{ рад/с}$ для Земли и $\omega_2 = 15 \text{ рад/с}$ для Марса при расчетной величине потока в ГЗУ равной $Q = 1.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Расчеты, представленные на рис. 2, б, выполнены для двухзаходного шнека, $n_z = 2$, как соответствующего лучшим показателям отбора по сравнению с аналогичными для $n_z = 1$.

При проведении расчетов отдельно исследовалось влияние условий гравитации на процесс забора сыпучей среды и выбор оптимальных соотношений его кинематических параметров. Как видно из рис. 2, б, уменьшение величины забора среды Q имеет ярко выраженный характер и функционально связано не только с кинематическими параметрами ω_1 , ω_2 , но также зависит от g . На рис. 2

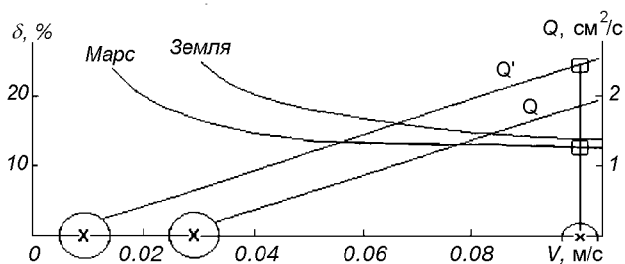


Рис. 3. Зависимости Q и δ от скорости V подачи РО в различных условиях гравитации

приведены сравнительные расчеты забора и перемишиваемости сыпучей среды. При этом величина δ так же, как и Q , существенно зависит от условий гравитации и с уменьшением величины g также уменьшается, сохраняя гиперболический вид зависимости от ω_2 .

В результате обработки и интерпретации численных результатов получена общая закономерность для отношения кинематических параметров процесса забора сыпучей среды (рассматриваемого фракционного состава) ω_1/ω_2 , которая заключается в том, что:

- модуль отношения $|\omega_1/\omega_2|$ определяет режим «запирания» ГЗУ;
- критическое значение модуля не зависит от условий гравитации, при которых применяется БРИ (при условии, что БРИ закреплен);
- критическое значение модуля отношения равно $|\omega_1/\omega_2| \approx 0.5$.

Аналогичная картина динамики среды наблюдается при варьировании ω_2 при выполнении критического отношения $|\omega_1/\omega_2|$. Значения исходных параметров для расчетов на рис. 2 составляли: $v = 0.005$ м/с; $\omega_1 = -1$ рад/с; $\alpha = 15^\circ$.

Обоснование достоверности полученных результатов проводилось на основе сравнения лабораторных и натурных экспериментов при варьировании допустимых параметров, определяющих математическую модель исследуемого процесса. В частности, лабораторные эксперименты позволили определить (при активном использовании результатов расчетов) рациональные значения угловой скорости ω_2 вращения РО, которая для земных условий близка к $\omega_{2\text{exp}} \approx 20$ рад/с, что достаточно хорошо согласуется с расчетным значением (рис. 2, б).

Минимальные значения показателя перемишиваемости δ в лабораторных условиях для параметров работы БРИ ($V = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с; $\omega_1 = -3$ рад/с; $\omega_2 =$

$= 6$ рад/с) и минимуме угла наклона α реборды транспортера ГЗУ при $n_z = 2$ равнялись:

$$\delta_{\min} = 5 \% \quad \text{при } \alpha = 11^\circ;$$

$$\delta_{\min} = 2.5 \% \quad \text{при } \alpha = 15^\circ.$$

Другим экспериментом, подтверждающим достоверность результатов расчета по программе KERN, является эксперимент, определяющий минимальную величину скорости подачи инструмента V , при которой происходит забор пробы среды. Ее величина в эксперименте равнялась $V_{\text{exp}} = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с, что также хорошо согласуется с расчетными данными (рис. 3). При этом забор Q и величина перемишиваемости δ отражают следующие закономерности:

- с увеличением скорости V величина потока Q увеличивается линейно, а перемишиваемости δ — асимптотически нелинейно;
- уменьшение величины сил гравитации благоприятно сказывается на параметрах процесса забора Q и δ , выражающееся как в их количественных показателях, так и в уменьшении предельных значений параметров, определяющих «запирание» керноприемной полости ГЗУ.

Результаты расчетов сопоставлялись также с результатами экспериментов по влиянию условий гравитации, выполнение которых проводилось в условиях невесомости на базе летающей лаборатории АН-76 в условиях свободного падения (время эксперимента до 80 с), что позволило оценить адекватность математической модели изучаемому процессу.

Таким образом, расчеты по отбору пробы сыпучей среды с помощью ГЗУ типа «шнековый транспортер» методом численного эксперимента позволили определить влияние параметров ω_1 , ω_2 , V , n_z и g на процесс, определяемый характеристиками Q и δ . В результате расчетов, кроме перечисленных выше закономерностей, определен механизм динамики сыпучей среды в ГЗУ шнекового типа, который включает как описание вязко-пластической модели среды, так и граничные условия (силы трения на контактах, подпор давления) и нагрузки в виде массовых сил. Он позволяет с помощью управления режимными параметрами ω_1 , ω_2 и V при заданных значениях n_z и g , формировать с учетом реологических свойств среды условия ее отбора с заданными оптимальными значениями параметров Q и δ .

На основании серии расчетов по программе KERN были определены следующие диапазоны значений режимных функциональных характеристик, обеспечивающие необходимый объем отбираемой пробы среды с минимальной величиной ее

перемешиваемости как показателя сохранения структуры исследуемого геологического объекта:

$$\begin{array}{ll} \text{для Земли} & \text{для Марса} \\ g = 9.87 \text{ м/с}^2; & g = 3.72 \text{ м/с}^2; \\ |-\omega_1/\omega_2| \approx 0.5 \text{ при } \omega_1 < 0; \omega_2 > 0 & \\ \omega_2 = 19 \text{ рад/с}; & \omega_2 = 15 \text{ рад/с}; \\ V_{\text{кр}} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}; & V_{\text{кр}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} \end{array}$$

в диапазоне скоростей подачи РО $V = 0.001$ — 0.01 м/с.

1. Алимов О. Д., Фролов А. В., Цокурено А. А. и др. Исследование свойств горных пород Венеры по результатам бурения. — Фрунзе: Илим, 1987.—109 с.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1973.—847 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979.—392 с.
4. Стажевский С. Б. Задачи деформирования сред с внутренним трением и дилатансией в горном деле: Автореф. дис. д-ра тех. наук. — Новосибирск, 1988.—38 с.

5. Фролов А. В., Цокурено А. А. Обоснование алгоритма формирования и обработки информации бурового робота-информатора. — 1988.—53 с.—(НИИ ИМПУЛЬС АН Кирг. ССР, № 0659).

**MATHEMATICAL MODELING
AND OPTIMIZATION OF MEDIUM SAMPLING
BY A DRILL ROBOT-INFORMANT
IN EXTREME CONDITIONS OF MARS**

A. A. Tsokurenko

We formulate the problem of calculating the motion of dry substances in a device with complex geometry and describe its solution by the methods of simulating and finite elements. A viscous-plastic mathematical model of the medium includes physical and geometric nonlinearities which describe the medium behavior as a fluid and as a solid body. The problem is considered as the optimization of functional characteristics defining the process. Basically new results and relationships were obtained. The optimization algorithms were successfully tested in scientific space experiments.