

С.Н. Кох ¹, А.А. Дектерев ², Э.В. Сокол ¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИРОДНОГО ГИГАНТСКОГО КОРОТКОЖИВУЩЕГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛА: НА ПРИМЕРЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА КАРАБЕТОВА ГОРА, 2000 г. (ТАМАНЬ)

В статье изложены результаты теплофизического моделирования в программном комплексе SigmaFlow природного гигантского короткоживущего газового факела, сопровождавшего извержение грязевого вулкана Карabetова гора 6 мая 2000 г. Впервые выполнена количественная оценка объемов сгоревшего в ходе извержения газа, который составил 346 500 м³ холодного газа. Результаты математического моделирования огненного извержения грязевого вулкана Карabetова гора показали, что высокодебитный прямоточный индивидуальный свободный вертикальный метановый факел высотой 400 м, с точкой выхода пламени, расположенной на поверхности земли, способен прогреть расположенные под ним породы до температуры не более 280 °С. Факел такой конфигурации не способен создать значимый теплоперенос на дневную поверхность и обеспечить возникновение высокотемпературного ($T = 1000\text{--}1400\text{ °C}$) пирогенного ореола.

Ключевые слова: грязевый вулкан, газовый факел, термометаморфизм, математическое моделирование, п-ов Тамань.

Введение

Грязевулканические провинции активно проявляют себя как области массовой эмиссии газообразных углеводородов — главным образом метана (Губкин, Федоров, 1938; Ковалевский, 1940; Дадашев, 1963; Якубов и др., 1971; 1978; Шнюков и др., 1986; 2005; Рахманов, 1987; Лаврушин и др., 1996; Холодов, 2002; Etiope, Klusman, 2002; Kopf, 2002; Milkov et al., 2003; Schmidt et al., 2005). Газовые струи различной локализации, дебита и состава распространены здесь повсеместно. При этом масштабы газовой эмиссии разнятся на порядки не только для разных регионов, но и для одной территории. Одним из актуальных вопросов, поставленных еще в 50-е годы прошлого века, была и остается оценка объемов газа, выброшенного в атмосферу во время извержений.

Прямой замер дебита газовых струй возможен только в спокойном режиме эманации (Шнюков и др., 2005; Herbin et al.,

© С.Н. КОХ, А.А. ДЕКТЕРЕВ, Э.В. СОКОЛ, 2015

2008; Mazzini et al., 2009; Hong et al., 2013). Колоссальный объем газовых выбросов, одномоментно выделяющихся при взрывных извержениях, замерить практически невозможно. В разное время были созданы различные алгоритмы полуколичественных оценок дебита газовых струй. Н.А. Кудрявцев (1963), базируясь на аналогии между беспламенными извержениями грязевых вулканов и открытыми газовыми фонтанами на скважинах, предложил оценивать расход газа, учитывая дебит свободно бьющего фонтана, соотношение диаметров жерла и скважины, давления газа и продолжительности фонтанирования. Подход А.М. Плотникова (1967) был основан на оценке мощности газовой струи, рассчитанной через объем выброшенной во время извержения сопочной брекчии, глубину ее выноса и диаметр подводящего канала. Наиболее реалистичные результаты такого рода оценок, на наш взгляд, дает подход Г.П. Тамразяна — Ф.Г. Дадашева (Дадашев, 1963). Однако он применим только для извержений с воспламенением, поскольку граничные условия задачи в данном случае определяются, исходя из геометрических параметров газовых факелов.

Насколько часто извержения грязевых вулканов сопровождаются воспламенением газовых струй? На отдельных территориях Апшеронского и Таманского полуостровов, Каспийского и Азовского морей, Бирмы и острова Тринидад газовые эманации и фонтаны регулярно самовозгораются при выходе в атмосферу с образованием факелов. В Таманской провинции за период с 1818 по 2005 г. из 77 зафиксированных здесь извержений 12 (около 15 %) сопровождались «огненными явлениями» (Шнюков и др., 2005). В Азербайджане уже 30 % извержений (108 из 387 за период 1810—2007 гг.) характеризуются как «извержения с пламенем». Из них половину (58) сопровождали горящие факелы (Алиев и др., 2009). Обзор литературных данных позволяет сделать вывод, что гигантские факелы (высотой до 400 м) существуют не более получаса, тогда как крупные факелы (50—150 м) способны гореть в атмосфере до нескольких часов. Длительное горение (от нескольких месяцев до сотен лет) до сих пор было отмечено только для мелких газовых струй, поднимающихся к поверхности через систему сообщающихся трещин (Ковалевский, 1940; Рахманов, 1987; Алиев и др., 2009). Таким образом, есть веские основания предполагать наличие обратной корреляции между размером метанового факела и длительностью его существования (рис. 1).

Впервые оценки объема сгорающего в ходе извержения газа были выполнены Г.П. Тамразяном на примере грязевых вулканов Азербайджана. Уравнение учитывало следующие переменные величины: высота столба пламени, диаметр его окружности, время существования факела и скорость выделения газа, определенная по скорости образования горящих клубов газа и дыма. Этот подход затем был развит Ф.Г. Дадашевым (1963), подсчитавшим объем сгоревшего газа для ряда грязевых вулканов Апшеронского полуострова. По мнению самого автора, рассчитанные таким образом величины нельзя использовать как абсолютные, однако они позволяют корректно оценить объем выделившегося газа с точностью до порядка.

В настоящее время разделы теплофизики, посвященные анализу процессов воспламенения и горения газообразных смесей, глубоко разработаны теоретически и имеют многочисленные прикладные аспекты (Ахметов, 1994; 2007; Кузнецов, Конопасов, 2008). В данной статье этот аппарат был впервые использован при построении количественной модели возникновения и развития природного газового факела, сопровождающего извержение грязевого вулкана.

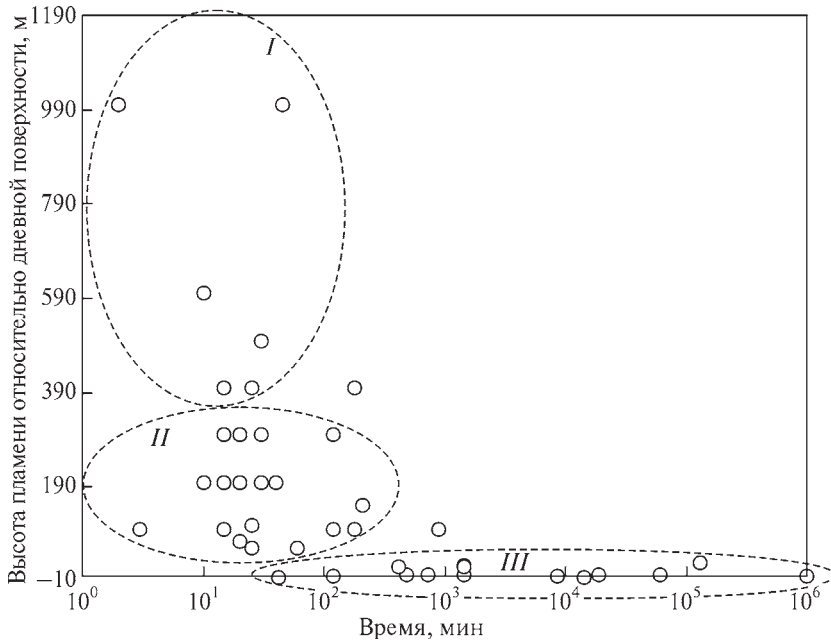


Рис. 1. График зависимости между размерами метановых факелов и длительностью их существования по [Ковалевский, 1940; Рахманов, 1987; Алиев и др., 2009]. I — гигантские факелы; II — крупные факелы; III — мелкие струи

В статье изложены результаты математического моделирования природного гигантского короткоживущего газового факела. Расчеты выполнены на базе программного комплекса SigmaFlow (Каменщиков и др., 1995; Дектерев и др., 2010; Dekterev et al., 2010), который обладает уникальными возможностями и предназначен для компьютерного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена. Он позволяет моделировать пространственные стационарные и нестационарные течения в жидкости и газе; ламинарные и турбулентные течения; химическое реагирование и процессы смешения в многокомпонентных смесях; горение газообразного, жидкого и твердого топлива; конвективный, кондуктивный и радиационный теплообмен. В данной работе граничные условия для постановки и решения теплофизических и газодинамических задач впервые были количественно определены, исходя из реальной геологической ситуации и конкретного сценария извержения грязевого вулкана Карabetова гора (Тамань) 6 мая 2000 г. (Шнюков и др., 2009).

Впервые выполнена количественная оценка объемов газа, сторевшего в ходе этого извержения.

Общие сведения о грязевом вулкане Карabetова гора

Грязевый вулкан Карabetова гора расположен на Таманском полуострове в 5 км восточнее станицы Тамань (45°12'16"С; 36°47'05"В). Грязевулканическая постройка представляет собой плато, расположенное на высоте 142 м над уровнем моря, с несколькими доминирующими кратерами и серией мелких

грифонов и сальз. В составе твердых выбросов этого вулкана преобладают породы майкопских и, в меньшей мере, сарматских отложений. Корни грязевого вулкана Карabetова гора прослежены до глубины 4,5—9 км (Шнюков и др., 2005; Собисевич и др., 2008). Крупные извержения Карabetовой горы относятся к взрывному типу и происходят регулярно — за последние 200 лет их было, как минимум, 25, из них 4 сопровождались воспламенением газа (Шнюков и др., 2005).

Состав выделяющихся газов непостоянен, однако в нем неизменно преобладает метан. Так, в 1962 году газовые выбросы Карabetовой горы были метановыми (около 95 % CH_4). В 1968 году доля метана сократилась до 56 %, а 43 % пришлось на долю CO_2 . В ходе извержения 2000 года выделялся преимущественно метан с незначительной примесью тяжелых углеводородов, CO_2 , азота и гелия (Шнюков и др., 2005).

Сценарий извержения вулкана Карabetова гора 6 мая 2000 года

Детали извержения грязевого вулкана Карabetова гора 6 мая 2000 года и его сценарий были ранее охарактеризованы Е.Ф. Шнюковым и др. (2009). Извержение сопровождалось появлением огненного факела высотой 300—400 м. По свидетельствам очевидцев извержению предшествовал взрыв, за которым последовал сильный хлопок, яркая вспышка в атмосфере и воспламенение газового столба. Горящая часть факела имела шаровидную форму и яркое белое свечение, отвечающее температуре пламени не менее 1400 °С. В активную фазу извержения было выброшено около 60 тонн сопочной брекчии. Глыбы объемом до 2 м³ были отброшены от канала на расстояние до 30 м (рис. 2). Количество воды в продуктах этого выброса было незначительным.

По данным И.Н. Гусакова, для грязевых вулканов Тамани величина газового фактора в момент извержения варьирует от 700 (1 м³ грязи/700 м³ газа) до 1200. На этом основании Е.Ф. Шнюковым и др. (2009) были выполнены оценки объема газа, выброшенного в ходе извержения 2000 г., которые составили 21—36 млн м³ (при плотности обводненной сопочной брекчии порядка 2 кг/м³).

Кратерная воронка диаметром 15—20 м и глубиной 4 м образовалась на периферии ранее существовавшего кратера сразу после взрыва. Через 4 часа жерло полностью заполнилось сопочной брекчией, однако через новообразованные трещины в сопочной брекчии продолжалась эмиссия газа. Высокотемпературный термический ореол вокруг кратерной воронки отсутствовал, но на периферии новообразованного кратера были разбросаны блоки обожженной до кирпичного состояния или (реже) ошлакованной сопочной брекчии (Рис. 2). На этом основании был сделан вывод, что обжиг глыб сопочной брекчии происходил непосредственно в газовом факеле (Шнюков и др., 2009).

Моделирование теплового воздействия газового факела на окружающие породы

Подходы и алгоритмы. Предполагается, что поток горячего газа поступает из узкого вертикального канала и сгорает в воздушной атмосфере, при этом суммарный (радиационный и конвективный) тепловой поток от факела

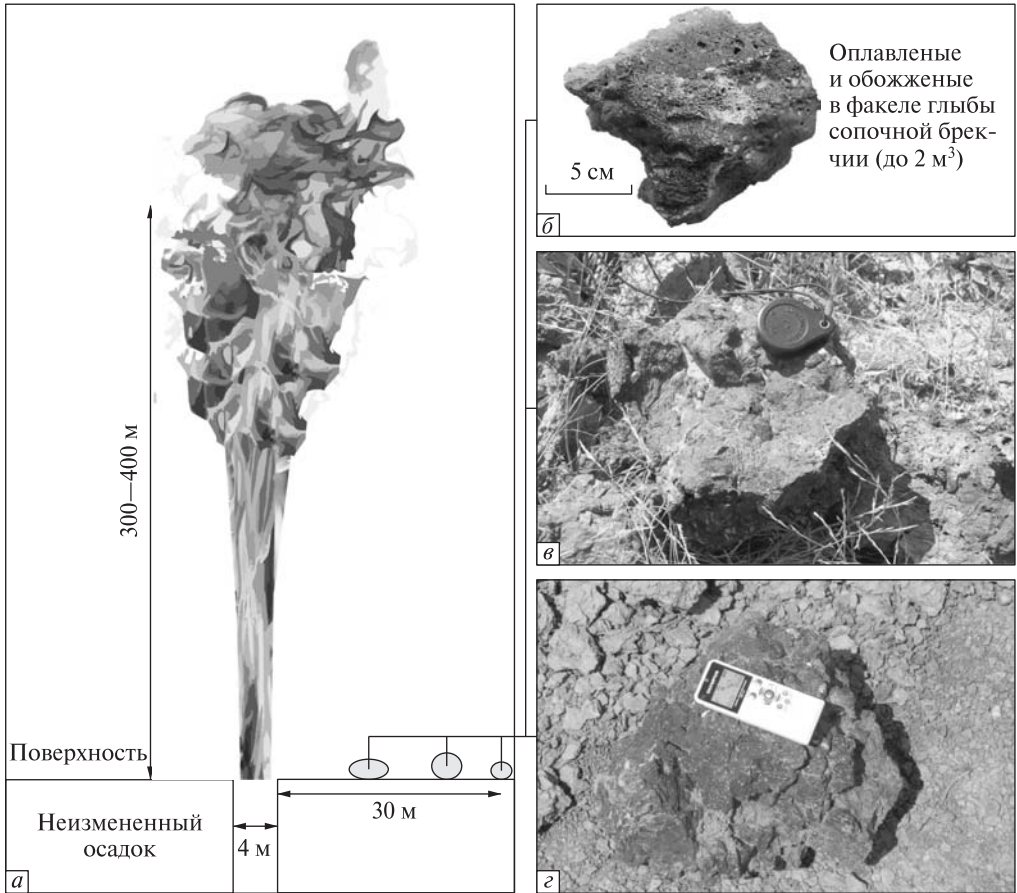


Рис. 2. Схема расположения горящего газового факела и пирогенных продуктов во время извержения грязевого вулкана Карабетова гора (Тамань) 6 мая 2000 г.: а — постановка задачи для моделирования, б, в, з — оплавленные в горящем газовом факеле фрагменты глыб сопочной брекчии. Фото 2008

нагревает породы вокруг скважины. Для расчета такого рода процессов необходимо использовать модели для описания турбулентных потоков, газозафазного турбулентного горения, радиационного переноса излучения и теплопроводности в грунте.

Для моделирования течения газа решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. Для замыкания уравнений использовалась двузонная модель турбулентности Ментера (MSST) (Menter, 1993). Для расчета горения газа выбрана гибридная модель, по которой скорость реагирования горючего газа и окислителя рассчитывается на основе многоступенчатого механизма реагирования и метода, учитывающего скорость турбулентного перемешивания газовых компонент. В качестве механизма реагирования выбрана схема из 4-х глобальных реакций JL-1 (Kim et al., 2008).

Для расчета радиационного теплообмена использовалась модель дискретных ординат. Коэффициент поглощения газа вычислялся по модели взвешенной суммы серых газов (Litvintsev, Dekterev, 2008). Для дискретизации системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса массы, им-

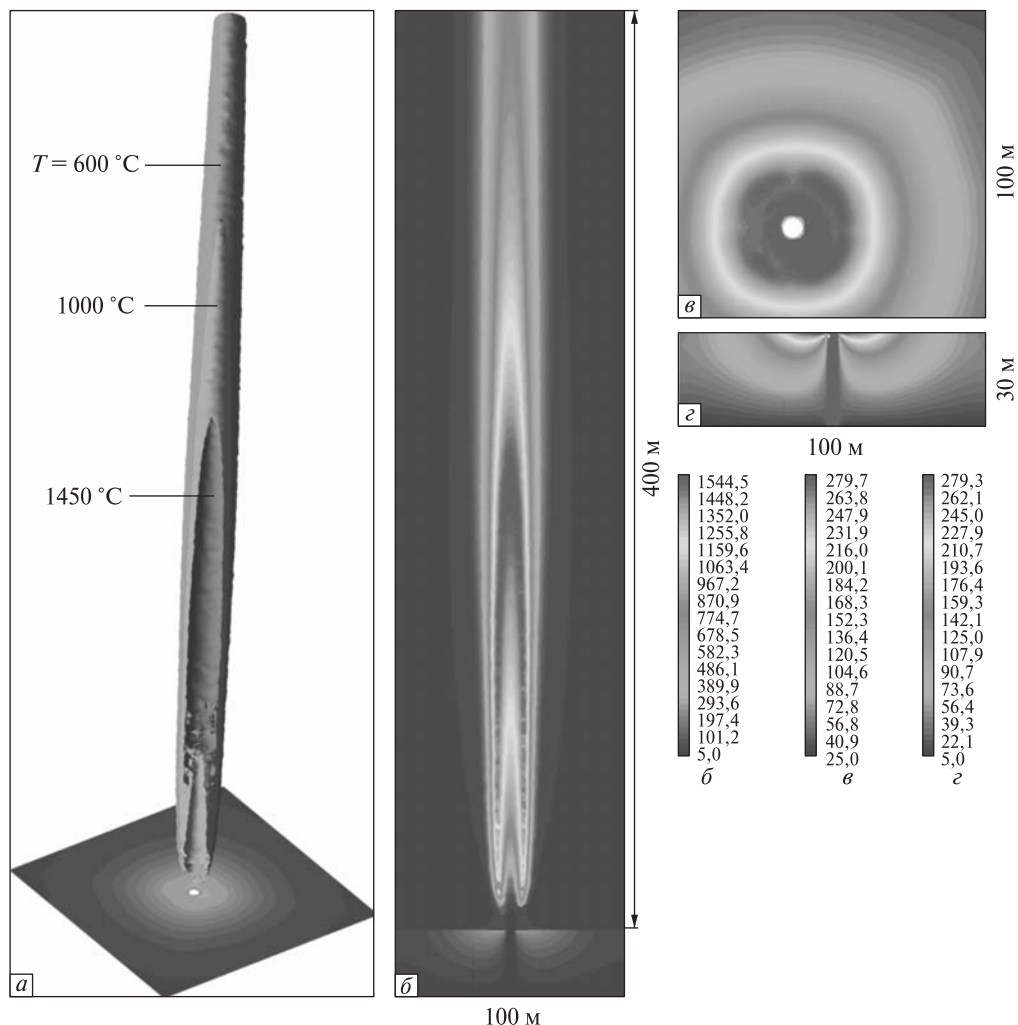


Рис. 3. Расчетный единичный прямолинейный метановый факел (извержение грязевого вулкана Карabetова Гора, Тамань, 6 мая 2000 года): *a* — изоповерхности температуры факела; *б* — поле температуры в центральном вертикальном сечении факела (°C); *в* — поле температуры на поверхности земли (°C); *г* — поле температуры в разрезе грунта глубиной 30 м (°C)

пульса, энергии и турбулентных характеристик, использовался метод конечного объема (Патанкар, 2003). Конвективные и диффузионные члены уравнений аппроксимировались схемами второго порядка точности. Описанные выше модели реализованы в программном комплексе SigmaFlow, (Каменщиков и др., 1995). Этот программный комплекс был ранее протестирован на широком классе задач аэро-гидродинамики, тепло-массообмена и горения (Дектерев и др., 2010; Dekterev et al., 2010).

Для расчета факела, сопровождавшего извержение грязевого вулкана Карabetова гора 6 мая 2000г., была использована рассмотренная выше математическая модель, а также неструктурированные расчетные сетки, содержащие более 500 тысяч многогранных объемов.

Постановка задачи

Для корректной формулировки граничных и минимизации количества произвольно заданных параметров модели были собраны и проанализированы литературные данные, результаты натурных наблюдений специалистов и свидетельства очевидцев.

Для моделирования были использованы следующие граничные условия: горючий газ (CH_4 — 100 %) истекает в атмосферу из подводящего канала диаметром 4 м. Точка выхода пламени располагается на поверхности земли. Температура газа и окружающей среды составляет 25°C ; температура грунта на глубине 30 м равна 5°C . Зона высокотемпературного прогрева пород ($T > 500^\circ\text{C}$) вокруг подводящего канала отсутствует.

При выполнении расчетов варьировался расход и состав горючего газа. Было установлено, что присутствие в газовой смеси CO_2 в количестве до 10 об. % не оказывает значимого влияния на результаты моделирования. Вариант расчета с расходом метана 250 кг/с максимально приближен к реальным параметрам факела. При скорости выхода смеси, превышающей скорость распространения пламени, происходит отрыв фронта пламени от среза сопла и его подвешивание на некоторой высоте. В рассмотренном случае при дебите струи 250 кг/с факел отрывается от дневной поверхности на высоту до 10 м. Вследствие этого основной тепловой поток на поверхность земли обеспечивается за счет радиационного механизма теплопередачи и существенно снижается. Согласно расчетам, максимальная плотность радиационного потока на поверхность достигала $16,7 \text{ кВт/м}^2$, а максимум температуры на поверхности земли непосредственно под факелом не превышал 280°C . Это объясняет отсутствие термогенного ореола вокруг подводящего канала грязевого вулкана Карabetова гора (рис. 3).

Отсутствие свидетельств очевидцев не позволило оценить реальное время существования горящего факела в ходе извержения 6 мая 2000 г. Поэтому в расчетах было использована средняя длительность существования метанового факела соответствующих геометрических параметров, которая составляет около 15 минут (см. рис. 1). Рассчитанный объем газа, сгоревшего в этом факеле, составил $346\,500 \text{ м}^3$ (225 тонн) холодного газа (нормальные условия) или $\sim 2\,000\,000 \text{ м}^3$ (при T газа в центральной части факела 1550°C).

Обсуждение результатов

В дополнение к математическому моделированию с использованием программного комплекса SigmaFlow, объем газа, сгоревшего в ходе извержения грязевого вулкана Карabetова гора 6 мая 2000 года, был рассчитан с использованием подхода, предложенного ранее Г.П. Тамразяном и Ф.Г. Дадашевым (Дадашев, 1963). Для расчета объема сгоревшего газа использовалась формула

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \times h \times \frac{T}{t}, \quad (1)$$

где h — высота столба пламени — 300 м, d — диаметр его окружности — 20 м, T — время существования факела — 15 минут. Время полного сгорания газового столба (t) по Дадашеву (1963) равно 20 секундам. Очевидно, что объемы газовой эмиссии грязевого вулкана Карбетова гора во время извержения 6 мая 2000г.,

рассчитанные по двум разным алгоритмам для горячего газа, имеют один порядок величин: $\sim 2\,000\,000\text{ м}^3$ (по алгоритму SigmaFlow) и $4\,239\,000\text{ м}^3$ (по алгоритму Дадашева (1963)). Таким образом, находит подтверждение мнение Ф.Г. Дадашева о том, что формула (1) позволяет оценить порядок величины, характеризующей объем сгоревшего газа. Расхождение полученных значений в 2 раза можно объяснить неопределенностью и произвольным выбором ряда параметров, используемых при расчетах в рамках обоих подходов. В алгоритме Дадашева (1963) это: видимый диаметр факела, видимая высота факела, примерное время подъема клубов огня на высоту факела. В расчетах с использованием программного комплекса SigmaFlow был использован только один неопределенный параметр — высота факела. При расчете визуализируется поле температуры, с которого считывается высота распространения высокотемпературной части факела. В реальности размеры зоны видимого пламени могут несколько отличаться от зоны максимальных температур. Таким образом, использование программного комплекса SigmaFlow позволяет повысить точность расчетов за счет минимизации числа неопределенных параметров.

Заключение

Посредством численного моделирования с использованием программного комплекса SigmaFlow было установлено, что высокодебитный прямоточный индивидуальный свободный вертикальный метановый факел с точкой выхода пламени, расположенной на поверхности земли, не способен обеспечить значимый теплоперенос на дневную поверхность. Это происходит вследствие отрыва факела от дневной поверхности. В случае рассмотренной модели газовый факел был поднят над поверхностью вулкана Карabetова гора на высоту 10 м. Согласно литературным данным, большинство гигантских факелов, сопровождавших крупные извержения грязевых вулканов, воспламенялись и горели на высоте от 20—30 до 150—200 м (Ковалевский, 1940; Рахманов, 1987; Алиев и др., 2009; Шнюков и др., 2005). Тепловой поток на поверхность земли в этом случае определялся преимущественным вкладом радиационной компоненты и не был способен обеспечить прогрев пород до температур, необходимых для термометаморфизма осадков. Согласно выполненным расчетам, при извержении грязевого вулкана Карabetова гора 6 мая 2000 г. температура прогрева пород под факелом не превышала $280\text{ }^\circ\text{C}$, что и объясняет отсутствие здесь высокотемпературного пирогенного ореола. Обследование оплавленных с поверхности глыб сопочной брекчии, обнаруженных вблизи подводящего канала, позволило ранее сделать вывод о том, что высокотемпературный обжиг и приповерхностное плавление пелитовых осадков были кратковременными и происходили только в самом факеле в момент взрыва и воспламенения газовой струи (Шнюков и др., 2009).

Результаты выполненного в данной работе теплофизического моделирования впервые позволяют сформулировать важные геологические выводы. Главный из них состоит в том, что высокодебитные газовые факелы, вследствие отрыва фронта горения от земной поверхности, целиком и бесследно сгорают в атмосфере и, вопреки ожиданиям, не оставляют ореолов термометаморфизма и/или плавления осадков. В свою очередь, отсутствие у гигантских факелов вы-

сокотемпературных ($T = 1000\text{—}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) термогенных ореолов, включающих породы, резистентные к процессам выветривания, не позволяет идентифицировать древние катастрофические извержения грязевых вулканов, сопровождавшиеся факельным горением газов.

Основываясь на результатах анализа природных и техногенных термических ореолов и численных моделях газовых факелов, можно с высокой вероятностью предполагать, что термические ореолы, генетически связанные с природными фокусами горения углеводородных газов, обязаны своим происхождением заглубленным фокусам горения. Это подтверждается как прямыми натурными наблюдениями на грязевых вулканах Каспийской провинции (Ковалевский, 1940; Алиев и др., 2009), так и реконструкциями глубины расположения очагов выплавления ультравысокотемпературных ($T = 1200\text{—}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) Са паралав в палеопостройке Наби Муса (Sokol et al, 2010; Сокол и др., 2012; Seryotkin et al., 2012) и легкоплавких Na паралав ($T = 900\text{—}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), обнаруженных на позднечетвертичных грязевых вулканах площади Алтын Эмель (Казахстан) (Grapes et al., 2013; Деев и др., 2014).

Авторы благодарят Гусакова И.Н. за участие в полевых работах. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-5754.2012.5) и Интеграционного проекта НАН Украины — СО РАН № 1(2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Рахманов Р.Р. Каталог зафиксированных извержений грязевых вулканов Азербайджана (1810—2007 гг.). Баку: Nafta-Press, 2009. — 110 с.
2. Ахметов Д.Г. Оценка расхода горящих газовых фонтанов по высоте диффузионного факела // ФВГ, 1994. — № 6. — С. 25—28.
3. Ахметов Д.Г. Вихревые кольца. Новосибирск: «Гео», 2007. — 151 с.
4. Губкин И.М., Федоров С.В. Грязевые вулканы Советского Союза и их связь с генезисом нефтяных месторождений Крымско-Кавказкой геологической провинции. М.; Л.: Акад. Наук СССР, 1938. — 43 с.
5. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В. Современные возможности CFD кода SifmaFlow для решения теплофизических задач // Сборник научных статей. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Киев: «НПВК Триакон», 2010. — № 2 (4). — С. 117—122.
6. Дадашев Ф.Г. Углеводородные газы грязевых вулканов Азербайджана. Баку: Азернешр, 1963. — 65 с.
7. Деев Е.В., Кох С.Н., Сокол Э.В., Зольников И.Д., Панов В.С. Грязевый вулканизм как показатель позднелайстоцен-голоценовой активности северо-восточного окончания Чилик-Кеминского разлома (Илийская впадина, Северный Тянь-Шань) // Доклады РАН, 2014. — 459. — № 3. — С. 1—6.
8. Каменщиков Л.П., Быков В.И., Дектерев А.А., Ковалевский А.М. Численное моделирование реагирующих турбулентных течений в трехмерных областях сложной конфигурации // Химическая промышленность, 1995. — № 1. — С. 43—47.
9. Ковалевский С.А. Грязевые вулканы южного Прикаспия (Азербайджана и Туркмении). Баку: Азгостоптехиздат, 1940. — 200 с.
10. Кудрявцев Н.А. Глубинные разломы и нефтяные месторождения. Л.: Гостоптезиздат, 1963. — 220 с.
11. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Экспериментальное моделирование факелов горящих газовых и нефтяных скважин. Тепловые установки метеотрон II и III // Инженерная физика, 2008. — № 3. — С. 20—24.

12. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, геохимическим и геологическим данным) // Литология и полезные ископаемые, 1996. — № 6. — С. 625—647.
13. Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании нефтегазоносности недр. М.: Недра, 1987. — 174 с.
14. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2003. — 312 с.
15. Плотников А.М. Потери углеводородов на грязевых вулканах Керченского полуострова / В кн.: Геология и нефтегазоносность Причерноморской впадины, 1967. — С. 72—81.
16. Собисевич А.Л., Горбатов А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // Доклады РАН, 2008. — т. 422 (4). — С. 542—546.
17. Сокол Э.В., Козьменко О.А., Кох С.Н., Ванник Е. Газовые коллекторы района Мертвого моря — реконструкция на базе геохимических характеристик паралав // Геол. и геоф., 2012. — т. 53. — № 8. — С. 975—997.
18. Холодов В.Н. Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах (на примере Восточного Предкавказья). М: Наука, 1983. — 151 с.
19. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гратенко Г.И. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Киев: Наук. Думка, 1986. — 148 с.
20. Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: ГлавМедиа, 2005. — 176 с.
21. Шнюков Е.Ф., Сокол Э.В., Нигматулина Е.Н., Коржова С.А., Гусаков И.Н. «Огненное извержение» грязевого вулкана Карабетова гора, 2000 г.: сценарий события, продукты извержения, минералогия и петрография плавленых пород // Геология и полезные ископаемые мирового океана, 2009. — № 4. — С. 77—94.
22. Якубов А.А., Али-Заде А.А., Зейналов М.М. Грязевые вулканы Азербайджанской ССР. Баку, 1971. — 256 с.
23. Якубов А.А., Али-Заде А.А., Рахманов Р.Р., Мамедов Ю.Г. Каталог зафиксированных извержений грязевых вулканов Азербайджана (за период 1810—1974 гг.). Баку, 1974. — 33 с.
24. Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Dekterev A.A. Euler-Euler and Euler-lagrange methods in modelling of two-phase dispersed flows // 12th Workshop on Two-Phase Flow Predictions, Halle; 03-22-2010 — 03-25-2010; in: «Proceedings of the 12th Workshop on Two-Phase Flow Predictions», M. Sommerfeld (ed.), 2010. — ISBN: 978—3-86829-222-0.
25. Etiope G., Klusman R.W. Geologic emissions of methane to the atmosphere // Chemosphere, 2002. — 49. — 8. — P. 777—789.
26. Grapes R., Sokol E., Kokh S., Fishman I., Kozmenko O. Petrogenesis of unusual Na-rich paralaavas during flame eruptions of mud volcanoes, Altyn-Emel National Park, Kazakhstan // Contribution to Mineralogy and Petrology, 2013. — v. 165. — P. 781—803.
27. Herbin J.P., Saint-Germès M., Maslakov N., Shnyukov E.F., Vially R. Oil Seeps from the «Boulganack» Mud Volcano in the Kerch Peninsula (Ukraine — Crimea), Study of the Mud and the Gas: Inferences for the Petroleum Potential // Oil & Gas Science and Technology — Rev. IFP, 2008. — v. 63. — № 5. — P. 609—628.
28. Hong W.-L., Etiope G., Yang T.F., Chang P.-Y. Methane flux from miniseepage in mud volcanoes of SW Taiwan: Comparison with the data from Italy, Romania, and Azerbaijan // Journal of Asian Earth Sciences, 2013. — v. 65. — P. 3—12.
29. Kim J.P., Schnell U., Scheffknecht G. Comparison of Different Global Reaction Mechanisms for MILD Combustion of Natural Gas // Combustion Science and Technology, 2008. — v. 180. — is. 4. — P. 565—592.
30. Kopf A.J. Significance of mud volcanism // Reviews of Geophysics, 2002. — v. 40. — № 2. — P. 1005—1012.
31. Litvintsev K. Yu., Dekterev A.A. Comparison of the Finite-Volume and Discrete-Ordinate Methods and Diffusion Approximation for the Radiative Heat Transfer Equation // Heat Transfer Research, 2008. — v. 39. — is. 8. — P. 653—660.
32. Mazzini A., Svensen H., Planke S., Guliyev I., Akhmanov G.G., Fallik T., Banks D. When mud volcanoes sleep: Insight from seep geochemistry at the Dashgil mud volcano, Azerbaijan // Marine and Petroleum Geology, 2009. — v. 26. — is. 9. — P. 1704—1715.

33. Menter F.R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows // AIAA Paper 93-2906, July 1993.
34. Milkov A.V., Sassen R., Apanasovich T.V., Dadashev F.G. Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean // Geophysical Research Letters, 2003. — 30. — P. 1037.
35. Schmidt M., Hensen C., Mörz T., Müller C., Grevemeyer I., Wallmann K., Mau S., Kaul N. Methane hydrate accumulation in «Mound 11» mud volcano, Costa Rica forearc // Marine Geology, 2005. — 216. — P. 77–94.
36. Seryotkin Yu.V., Sokol E.V., Kokh S.N. Natural pseudowollastonite: crystal structure, associated minerals, and geological context // Lithos, 2012. — 133–135. — P. 75–90.
37. Sokol E., Novikov I., Zateeva S., Vapnik Ye., Shagam R., Kozmenko O. Combustion metamorphism in Nabi Musa dome: new implications for a mud volcanic origin of the Mottled Zone, Dead Sea area // Basin Research, 2010. — v. 22. — P. 414–438.

Статья поступила 22.10.2014

С.Н. Кох, А.А. Дектерев, Э.В. Сокол

ТЕПЛОФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРИРОДНОГО
ГІГАНТСЬКОГО КОРОТКОЖИВУЧОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛА:
НА ПРИКЛАДІ ВИВЕРЖЕННЯ ГРЯЗЬОВОГО ВУЛКАНУ
КАРАБЕТОВА ГОРА, 2000 р (ТАМАНЬ)

В статті викладено результати теплофізичного моделювання в програмному комплексі SigmaFlow природного гігантського короткоживучого газового факела, що супроводжував виверження грязьового вулкана Карабетова гора 6 травня 2000 р. Вперше виконано кількісну оцінку обсягів згорілого в ході виверження газу, що склав 346 500 м³ холодного газу. Результати математичного моделювання вогняного виверження грязьового вулкана Карабетова гора показали, що високодебітний прямооточний індивідуальний вільний вертикальний метановий факел висотою 400 м, із точкою виходу полум'я, розташованою на поверхні землі, здатний прогріти розташовані під ним породи до температури не більше 280 °С. Факел такої конфігурації не здатний створити значущий теплопереніс на денну поверхню та забезпечити виникнення високотемпературного (Т= 1000–1400 °С) пірогенного ореолу.

Ключові слова: грязьовий вулкан, газовий факел, термометаморфізм, математичне моделювання, п-ів Тамань.

S.N. Kokh, A.A. Dekterev, E.V. Sokol

THERMOPHYSICAL MODEL FOR NATURAL
GIANT SHORT-LIVED GAS FLARE: AN EXAMPLE FROM ERUPTION
OF THE KARABETOVA GORA MUD VOLCANO, 2000 (TAMAN)

The gas fire accompanying the flame eruption of Karabetova gora (06.05.2000) and its thermal effect on the country rocks were simulated using the SigmaFlow software. The volume of erupted combustible gas (346 500 m³ of cold gas) was calculated at the first time. The numerical model of the Karabetova gora flame eruption shows that a single vertical flare up to 400 m high can heat up the rocks beneath it up to the temperature of 280 °C. Thus downstream heat flow is insufficient for the high temperature (Т = 1000–1400 °C) combustion metamorphism of the sediments.

Keywords: Mud volcano, gas flare, combustion metamorphism, numerical modeling, Taman Peninsula.