

Доктор геол.-минер. наук

Г.А Максимович

кандидат геол.-минер. наук **Ю.В. Архидьяконских**
(Пермский госуниверситет)

УСПЕХИ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУФФОЗИОННЫХ И КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ И СТРУКТУРНЫХ СТРУЙ

В науке любой эксперимент, производимый для выявления тех или иных закономерностей изучаемого явления или для проверки правильности и границ применимости найденных теоретическим путем результатов, по существу, представляет собой моделирование (БСЭ, т. 16, 1974). Физическое моделирование делает возможным непосредственно наблюдать и исследовать поведение и свойства потока жидкости в водопроницаемых горных породах при формировании полостей. В свою очередь, изучение структур струйного и полостного развития позволяет с достаточной полнотой раскрывать физико-механические свойства породы как в ненарушенных условиях, так и при наличии полостей. Основой такого моделирования явились, прежде всего, опыты с сухим песком (Энгессер, 1882; М. М. Протодяконов, 1912), «стремящимся вытечь» через отверстие в дне модели — деревянном ящике.

В результате была установлена возможность образования в сухих песках полостей, ограниченных так называемым сводом естественного равновесия (обрушения), что фиксировалось по весу песка на выдвигаемой пластинке, первоначально закрывающей отверстие в дне ящика. Однако образующийся свод визуально не наблюдался из-за быстрого его естественного разрушения. М.М. Протодяконов объяснял сводообразование арочным эффектом — заклиниванием песчинок при их «вытекании» из ящика. Энгессер полагал, что в сыпучих песках сам собой образуется

разгружающий давление свод, но считал, что так как свод состоит не из настоящих твердых клинчатых камней, а из отдельных песчинок, не связанных друг с другом, то сдвигение частиц вниз и разрушение свода возможно, если сдвигению не воспрепятствуют специальные вертикальные силы. На возможность образования в обводненных песках замкнутых полостей и «сводиков» обращали внимание многие исследователи (Тиккель, Коберли, 1928; В.И. Щуров, 1939; А.Ф. Лебедев, 1935; Г.А. Бабалян, 1940; С.К. Абрамов, 1947; Н.И. Шацов, 1947; Т.И. Маньковский, 1954; П.П. Климентов, 1959; М.С. Газизов, 1964; Г.В. Короткевич, 1964; Ч.И. Аббасов, 1965 и др.). Однако, такие полости при существующих условиях оттока жидкости могут оставаться устойчивыми только при постоянном режиме оттока, что подтверждено результатами натурных и лабораторных исследований (С.В. Комиссаров, 1954). При переменном режиме излива (эксплуатации) наблюдалось разрушение — рост полостей, вплоть до обрушения их сводов до поверхности земли.

Кафедрой динамической геологии и гидрогеологии ПГУ проводятся, начиная с 1954 года (с 1964 г. совместно с ВИКС), исследования в натурных и лабораторных условиях по изучению закономерностей развития карстовых и суффозионных полостей и причин потери ими устойчивости, результаты которых изложены более чем в 20 печатных работах (Ю.В. Архидьяконских, 1955, 1957, 1960, 1964, 1966, 1968, 1969, 1971, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979; Ю.В. Архидьяконских, С.В. Ершов, 1978; Ю.В. Архидьяконских, В.Е. Ерастов, и др., 1975; Ю.В. Архидьяконских, Н.М. Валитов и др., 1975; Г.А. Максимович, Ю.В. Архидьяконских, Н.А. Карачун, 1974; Г.А. Максимович, Ю.В. Архидьяконских, 1978), шесть разработок признаны изобретениями (Ю. В. Архидьяконских, 1964, 1965, 1969, 1977, 1978; Ю.В. Архидьяконских, В.А. Мищенко, 1967). Исследования позволили впервые установить в 1964 году образование замкнутых устойчивых к обрушению полостей в несцементированных обводненных песках при переменном режиме эксплуатации, а также в сухих песках. К настоящему времени возможность получения устойчивых полостей в обводненных несцементированных песках подтверждена другими исследователями (В.В. Толмачев, 1978 и др.).

Основные эксперименты — свыше 1000 выполнены ПГУ и ВИКС на моделях с высотой засыпки песка 600—700 мм и диаметром основания 800 мм. Модель, перфорированный каркас для засыпки песка которой обращен расширенной конической частью вниз, моделирует условия водопритока, существующие непосредственно на границе водоносного горизонта и подошвенного водоупора. Другое устройство с перфорированным каркасом цилиндрической формы моделировало условия средней части водоносного горизонта, большой мощности. При соответствующем подборе диаметров и расстояний между водоприемными отверстиями водоприемника действие гидродинамического давления на стенках полости становится пропорциональным (гармоничным) действию здесь геостатического давления, и полость после того, как скорости воды на ее границе станут ниже критической — размывающей скорости, не будет песковать как при изливе, так и при перерывах и последующем возобновлении излива. Установлено несколько форм устойчивых полостей: каплевидная, спиралеобразная, грибовидная, столбообразная, смерчевидная, лепесткообразная, сложная. Анализ условий формирования различных форм полостей заставил отказаться от взгляда на песок как неустойчивую породу, приобретающую устойчивость на стенках полостей за счет заклинивания песка при его вытекании. Необходимо считать доказанным, что песчаный массив, начиная с определенной глубины (в опытах первые десятки см) имеет свойство монолита. Это определяет выводы.

Проявление песком свойств монолита допускает наличие в водоносных нецементированных песках, помимо поровых, трещинных вод, т. к. раскрытые трещины могут быть устойчивыми, при скоростях воды ниже критических. Этот вывод согласуется с последними достижениями региональной гидрогеологии.

Разрушение полостей в обводненном песке возможно только за счет внешних факторов: превышения скорости потока выше критической—размывающей, недостаточной мощности кровли, несоответствия распределения сил гидродинамического обжатия перераспределению напряжений, вызванных геостатическим давлением, наличия вибрационного разуплотнения песка. Это позволяет создавать более эффективные способы проходки и опробования горных выработок, включая скважины.

Развитие полостей в обводненных песках идет по направлению трещин, главным образом вторичных, образующихся при перераспределении напряжений в массиве в процессе формирования самих полостей. Возникает сложный процесс саморазвития и самоусложнения: струя—полость, полость (трещина)—струя. Этот процесс и конечный продукт саморазвития — устойчивая водоприемная часть определяются, помимо степени однородности физико-механических свойств массива и водного потока, прежде всего, распределением водоприемных отверстий, по расстояниям между ними и диаметру, вдоль водоприемника. Это дает новую методику для изучения процессов саморазвития и самоусложнения сложных систем.

В качестве примера необходимо отметить успешное применение по аналогии результатов опытов в песках для выяснения некоторых закономерностей формирования систем карстовых полостей. Установлено (Г.А. Максимович, Ю.В. Архидьяконских, 1974, 1978), что устойчивой формой продольного профиля ходов пещер — профилем равновесия может быть, помимо обычного вогнутого, выпуклый профиль, возникающий за счет действия центробежных сил при чередованиях изгибов ходов пещеры в плане. Исследования в 1978 г. показывают, в каких условиях система карстовых полостей будет наиболее устойчива к обрушениям ее отдельных элементов, таких как, например, ходов и гротов. Устойчиво чередование близких по величине гротов с выдержанными, но значительно меньшими по размерам поперечного сечения чем гrotы ходами, при условии примерно одинакового расстояния между гротами (здесь и далее предполагается, что карстующийся массив однороден по свойствам по направлению развития карстовой системы). В случае, если размеры гротов уменьшаются в каком-либо направлении, в этом же направлении для повышения устойчивости системы должно пропорционально уменьшаться расстояние между соседними гротами.

Проведенные опыты позволили также установить, каким основным требованиям должны отвечать модели — устройства, заполняемые песком для изучения процессов, связанных с формированием замкнутых полостей, структурных струй и вторичной трещиноватости, помимо известных требований, предъявляемых к фильтрационным лоткам.

Наиболее приемлемой, с точки зрения обеспечения жесткости конструкции, является форма каркаса для засыпки песка, имеющая круговое горизонтальное сечение. Каркас прямоугольного сечения для указанных целей не надежен, т. к. допускает деформации в песке, вызываемые некоторым изменением формы каркаса во время опытов. Этим объясняется неустойчивость получаемых в сухом песке с помощью деревянного ящика (М.М. Протоdjяконов, 1931) полостей-сводов. Каркас на границе песко—вода (вне пределов каркаса) должен обеспечивать своим соотношением размеров, в вертикальной и горизонтальной плоскостях, направление потока жидкости (газа) к приемнику, соответствующее в общих чертах наклону линий тока в моделируемых природных условиях (верхняя, средняя, нижняя части водо-(нефте) газоносного горизонта. Каркасы сплошные—без боковой перфорации, открытые для питания жидкостью (газом) только сверху, равно как и каркасы, имеющие значительное превышение ширины основания над высотой, моделируют приток воды, нефти, газа только сверху, что является редким природным случаем, п они могут быть использованы для ограниченного круга специальных задач, таких например, как выяснение условий формирования органических труб. Они неприемлемы, например, при выяснении условий формирования провалов в рыхлых породах, развитых над закарстованным массивом, содержащим водо-(песчано) приемные поноры. При применении защитной сетки на перфорированном каркасе ее нужно перед каждым опытом обрабатывать соответствующим реактивом для ликвидации возникающих в перерывах между опытами водо-(нефте) отталкивающих свойств.

Разработанная Пермским госуниверситетом и Всесоюзным институтом карстоведения и спелеологии методика моделирования суффозионных полостей и структурных струй и результаты, полученные с помощью этой методики, позволяют утверждать о создании нового научного направления, связанного прежде всего с изучением саморазвивающихся и самоусложняющихся сложных природных систем. Учитывая большое теоретическое и прикладное значение этого направления, необходимо рекомендовать его широкое развитие, с привлечением для исследований в этой области большего круга специалистов разного профиля работы.

Доктор геол.-минер. наук **Г. А. Максимович**,
кандидат геол.-минер. наук **Ю. В. Архидьяко-**
ских (Пермский госуниверситет)

УСПЕХИ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУФФОЗИОН- НЫХ И КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ И СТРУКТУРНЫХ СТРУИ

В науке любой эксперимент, производимый для выявления тех или иных закономерностей изучаемого явления или для проверки правильности и границ применимости найденных теоретическим путем результатов, по существу представляет собой моделирование (БСЭ, т. 16, 1974). Физическое моделирование делает возможным непосредственно наблюдать и исследовать поведение и свойства потока жидкости в водопроницаемых горных породах при формировании полостей. В свою очередь, изучение структур струйного и полостного развития позволяет с достаточной полнотой раскрывать физико-механические свойства породы как в ненарушенных условиях, так и при наличии полостей. Основой такого моделирования явились, прежде всего, опыты с сухим песком (Энгессер, 1882; М. М. Протодяконов, 1912), «стремящимся вытечь» через отверстие в дне модели — деревянной ящике.

В результате была установлена возможность образования в сухих песках полостей, ограниченных так называемым сводом естественного равновесия (обрушения), что фиксировалось по весу песка на выдвигаемой пластинке, первоначально закрывающей отверстие в дне ящика. Однако образующийся свод визуально не наблюдался из-за быстрого его естественного разрушения. М. М. Протодяконов объяснял сводообразование арочным эффектом — заклиниванием песчинок при их «вытекании» из ящика. Энгессер полагал, что в сыпучих песках сам собой образуется разгружающий дав-

ление свод, но считал, что так как свод состоит не из настоящих твердых клинчатых камней, а из отдельных песчинок, не связанных друг с другом, то сдвижение частиц вниз и разрушение свода возможно, если сдвигению не воспрепятствуют специальные вертикальные силы. На возможность образования в обводненных песках замкнутых полостей и «сводов» обращали внимание многие исследователи (Тикель, Коберли, 1928; В. И. Шуров, 1939; А. Ф. Лебедев, 1935; Г. А. Бабалян, 1940; С. К. Абрамов, 1947; Н. И. Шапов, 1947; Г. И. Маньковский, 1954; П. П. Климентов, 1959; М. С. Газизов, 1964; Г. В. Короткевич, 1964; Ч. И. Аббасов, 1965 и др.). Однако такие полости при существующих условиях оттока жидкости могут оставаться устойчивыми только при постоянном режиме оттока, что подтверждено результатами натурных и лабораторных исследований (С. В. Комиссаров, 1954). При переменном режиме излива (эксплуатации) наблюдалось разрушение — рост полостей, вплоть до обрушения их сводов до поверхности земли.

Кафедрой динамической геологии и гидрогеологии ПГУ проводятся, начиная с 1954 года (с 1964 г. совместно с ВИКС), исследования в натурных и лабораторных условиях по изучению закономерностей развития карстовых и суффозионных полостей и причин потери ими устойчивости, результаты которых изложены более чем в 20 печатных работах (Ю. В. Архидьяконских, 1955, 1957, 1960, 1964, 1966, 1968, 1969, 1971, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979; Ю. В. Архидьяконских, С. В. Ершов, 1978; Ю. В. Архидьяконских, В. Е. Ерастов, и др., 1975; Ю. В. Архидьяконских, Н. М. Валитов и др., 1975; Г. А. Максимович, Ю. В. Архидьяконских, Н. А. Карачун, 1974; Г. А. Максимович, Ю. В. Архидьяконских, 1978), шесть разработок признаны изобретениями (Ю. В. Архидьяконских, 1964, 1965, 1969, 1977, 1978; Ю. В. Архидьяконских, В. А. Мищенко, 1967). Исследования позволили впервые установить в 1964 году образование замкнутых устойчивых к обрушению полостей в нецементированных обводненных песках при переменном режиме эксплуатации, а также в сухих песках. К настоящему времени возможность получения устойчивых полостей в обводненных нецементированных песках подтверждена другими исследователями (В. В. Толмачев, 1978 и др.).

Основные эксперименты — свыше 1000 выполнены ПГУ и ВИКС на моделях с высотой засыпки песка 600—700 мм и

диаметром основания 800 мм. Модель, перфорированный каркас для засыпки песка которой обращен расширенной конической частью вниз, моделирует условия водопритока, существующие непосредственно на границе водоносного горизонта и подошвенного водоупора. Другое устройство с перфорированным каркасом цилиндрической формы моделировало условия средней части водоносного горизонта, большой мощности. При соответствующем подборе диаметров и расстояний между водоприемными отверстиями водоприемника действие гидродинамического давления на стенках полости становится пропорциональным (гармоничным) действию здесь геостатического давления, и полость после того, как скорости воды на ее границе станут ниже критической — размывающей скорости, не будет песковать как при изливе, так и при перерывах и последующем возобновлении излива. Установлено несколько форм устойчивых полостей: каплевидная, спиралеобразная, грибовидная, столбообразная, смерчевидная, лепесткообразная, сложная. Анализ условий формирования различных форм полостей заставил отказаться от взгляда на песок как неустойчивую породу, приобретающую устойчивость на стенках полостей за счет заклинивания песка при его вытекании. Необходимо считать доказанным, что песчаный массив, начиная с определенной глубины (в опытах первые десятки см) имеет свойство монолита. Это определяет выводы.

Проявление песком свойств монолита допускает наличие в водоносных нецементированных песках, помимо поровых, трещинных вод, т. е. раскрытые трещины могут быть устойчивыми, при скоростях воды ниже критических. Этот вывод согласуется с последними достижениями региональной гидрогеологии.

Разрушение полостей в обводненном песке возможно только за счет внешних факторов: превышения скорости потока выше критической — размывающей, недостаточной мощности кровли, несоответствия распределения сил гидродинамического обжатия перераспределению напряжений, вызванных геостатическим давлением, наличия вибрационного разуплотнения песка. Это позволяет создавать более эффективные способы проходки и опробования горных выработок, включая скважины.

Развитие полостей в обводненных песках идет по направлению трещин, главным образом вторичных, образующихся при перераспределении напряжений в массиве в процессе

формирования самих полостей. Возникает сложный процесс саморазвития и самоусложнения: струя—полость, полость (трещина)—струя. Этот процесс и конечный продукт саморазвития — устойчивая водоприемная часть определяются, помимо степени однородности физико-механических свойств массива и водного потока, прежде всего, распределением водоприемных отверстий, по расстояниям между ними и диаметру, вдоль водоприемника. Это дает новую методику для изучения процессов саморазвития и самоусложнения сложных систем.

В качестве примера необходимо отметить успешное применение по аналогии результатов опытов в песках для выяснения некоторых закономерностей формирования систем карстовых полостей. Установлено (Г. А. Максимович, Ю. В. Архидьяконских, 1974, 1978), что устойчивой формой продольного профиля ходов пещер — профилем равновесия может быть, помимо обычного вогнутого, выпуклый профиль, возникающий за счет действия центробежных сил при чередованиях изгибов ходов пещеры в плане. Исследования в 1978 г. показывают, в каких условиях система карстовых полостей будет наиболее устойчива к обрушениям ее отдельных элементов, таких как, например, ходов и гротов. Устойчиво чередование близких по величине гротов с выдержанными, по значительно меньшими по размерам поперечного сечения чем гроты ходами, при условии примерно одинакового расстояния между гротами (здесь и далее предполагается, что карстующийся массив однороден по свойствам по направлению развития карстовой системы). В случае, если размеры гротов уменьшаются в каком-либо направлении, в этом же направлении для повышения устойчивости системы должно пропорционально уменьшаться расстояние между соседними гротами.

Проведенные опыты позволили также установить, каким основным требованиям должны отвечать модели — устройства, заполняемые песком для изучения процессов, связанных с формированием замкнутых полостей, структурных струй и вторичной трещиноватости, помимо известных требований, предъявляемых к фильтрационным лоткам. Наиболее приемлемой, с точки зрения обеспечения жесткости конструкции, является форма каркаса для засыпки песка, имеющая круговое горизонтальное сечение. Каркас прямоугольного сечения для указанных целей не надежен, т. к. допускает деформации в песке, вызываемые некоторым изменением формы

каркаса во время опытов. Этим объясняется неустойчивость получаемых в сухом песке с помощью деревянного ящика (М. М. Протодяконов, 1931) полостей-сводов. Каркас на границе песко—вода (вне пределов каркаса) должен обеспечивать своим соотношением размеров, в вертикальной и горизонтальной плоскостях, направление потока жидкости (газа) к приемнику, соответствующее в общих чертах наклону линий тока в моделируемых природных условиях (верхняя, средняя, нижняя части водо-(нефте)газоносного горизонта. Каркасы сплошные—без боковой перфорации, открытые для питания жидкостью (газом) только сверху, равно как и каркасы, имеющие значительное превышение ширины основания над высотой, моделируют приток воды, нефти, газа только сверху, что является редким природным случаем, и они могут быть использованы для ограниченного круга специальных задач, таких например, как выяснение условий формирования органных труб. Они неприемлемы, например, при выяснении условий формирования провалов в рыхлых породах, развитых над закарстованным массивом, содержащим водо-(песчано)приемные поноры. При применении защитной сетки на перфорированном каркасе ее нужно перед каждым опытом обрабатывать соответствующим реактивом для ликвидации возникающих в перерывах между опытами водо-(нефте)отталкивающих свойств.

Разработанная Пермским госуниверситетом и Всесоюзным институтом карстоведения и спелеологии методика моделирования суффозионных полостей и структурных струй и результаты, полученные с помощью этой методики, позволяют утверждать о создании нового научного направления, связанного прежде всего с изучением саморазвивающихся и самоусложняющихся сложных природных систем. Учитывая большое теоретическое и прикладное значение этого направления, необходимо рекомендовать его широкое развитие, с привлечением для исследований в этой области большого круга специалистов разного профиля работы.