

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАМЕННОЙ СОЛИ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ВИХРЕЙ

В.П. Малюков

Кафедра нефтепромысловой геологии, горного и нефтегазового дела
Российский университет дружбы народов
Ул. Орджоникидзе, д. 3, Москва, Россия, 115419

Впервые исследовано разрушение поверхности каменной соли при гидродинамическом воздействии концентрированных вихрей, образующихся в процессе массоотдачи.

Строительство подземных выработок-емкостей в каменной соли для хранения газонефтепродуктов, а также отработка подземных камер для добычи рассола на рассолопромыслах проходит при подаче растворителя (воды) через буровую скважину. При этом процесс отработки подземных выработок характеризуется как подземное растворение (одно из направлений физико-химической геотехнологии) [1].

В 1982 г. была опубликована первая работа по исследованию поверхности каменной соли при гидродинамическом воздействии растворителя как в лабораторных, так и природных условиях [2]. В опубликованных ранее работах [3; 4; 5; 6] приведены параметры получающейся при гидродинамическом воздействии растворителя волнообразной (синусоидальной) шероховатости на поверхности каменной соли, а также параметры неровностей, которые образуются на поверхности каменной соли в результате воздействия приповерхностных вихрей.

В настоящей статье рассмотрено разрушение каменной соли в процессе растворения при воздействии вихрей, образующихся у поверхности каменной соли. Вихревые движения, образующиеся у поверхности каменной соли в процессе гидродинамического воздействия растворителя, предлагается назвать концентрированными вихрями.

Концентрированные вихри — вихревые движения, возникающие тогда, когда завихренность сосредоточена в пространственно локализованных областях, с локализацией по крайней мере в одном направлении [7]. Вихревые явления в процессе массоотдачи при гидродинамическом воздействии на каменную соль рассматриваются впервые, поэтому в статье приводятся примеры подобных явлений из смежных областей, где подобные явления исследовались ранее [7; 8].

Почти универсальным свойством течений является их изменчивость. При исследовании подобных процессов используют наблюдения, математические методы (аналитические или численные) и лабораторные эксперименты.

Обычно теория и эксперимент направлены на то, чтобы объяснить основные механизмы образования гидродинамических структур, формы и размеры образующихся вихревых структур, а не промоделировать все сложности природного яв-

ления. Для решения подобных задач удается применить многие идеи, методы и результаты из других областей. Примеры образования концентрированных вихрей приведены на рисунках.

На рис. 1 представлена схема обтекания дельтовидного крыла под большим углом атаки (продольные вихри в турбулентном пограничном слое).

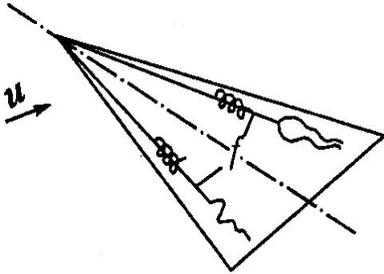


Рис. 1. Обтекание дельтовидного крыла под большим углом атаки (продольные вихри в турбулентном пограничном слое)
Источник: [7]

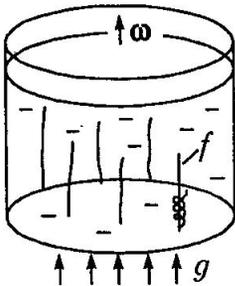


Рис. 2. Система вихревых шнуров во вращающемся слое жидкости, подогреваемой снизу
Источник: [7]

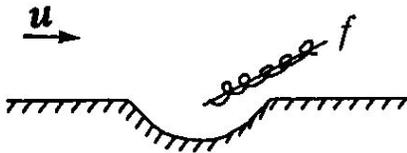


Рис. 3. Вихревые нити при обтекании лункообразной каверны
Источник: [9]

На рис. 2 представлена система вихревых шнуров во вращающемся слое жидкости, подогреваемой снизу. В процессе отработки ступеней подземной выработки на противотоке при открытой потолочине, когда снизу происходит подъем менее насыщенного растворителя и опускание сверху более насыщенного растворителя, возможно образование в потоке винтообразной вихревой структуры (наподобие схемы на рис. 2).

На рис. 3 представлены вихревые нити при обтекании лункообразной каверны. Авторы работы по вихреобразованиям при обтекании водой искусственно созданных (техногенных) полусферических лунок назвали эти неровности лунками [9]. В работе [2], посвященной исследованию естественных неровностей полусферической формы, образующихся на поверхности каменной соли при гидродинамическом воздействии растворителя, подобные неровности названы кратерами.

Главным механизмом интенсификации теплообмена на поверхности с лункообразными кавернами является образование протяженных концентрированных вихрей или, как говорят, смерчеобразных структур.

На рис. 4 изображены ламинарные и турбулентные кольца.

Вихревая нить (точечный вихрь) представляет собой не только простую и удобную модель реальных вихрей, но и основу для построения математических моделей более сложных вихревых течений.

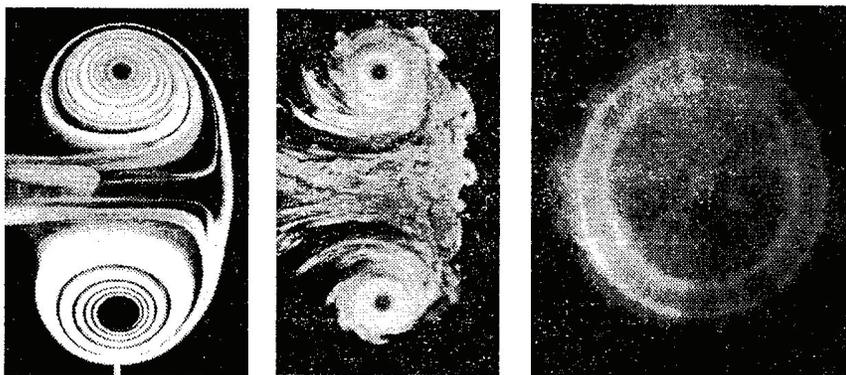


Рис. 4. Ламинарные и турбулентные вихревые кольца.
Визуализация дымом

Источник: [7]

Анализ динамики концентрированных вихрей позволяет объяснить особенности их взаимодействия друг с другом и с поверхностью каменной соли. В настоящее время вихревая динамика активно исследуется.

Теоретический пограничный слой — это сильное взаимодействие между переносом в поле внешнего потока и собственным самоиндуцированным вихревым движением, связанным с вязкой диффузией от границы [8]. Вязкость приводит к генерации завихренности у твердых границ. Проблема описания движений поверхностей раздела может быть во многих случаях связана с динамикой вихревой пелены.

В одном из предельных случаев завихренность сконцентрирована в бесконечно тонком слое вдоль некоторой трехмерной поверхности, которую называют вихревой пеленой.

Экспериментально обнаружено, что вихрь может претерпевать быстрые изменения, так что характер течения существенно меняется. Это явление называют разрушением (breakdown) или взрывом (bursting) вихря, поскольку вихрь как бы взрывается изнутри, локально увеличиваясь в размерах. При разрушении на оси вихря образуется симметричный пузырь, либо наблюдается образование неосесимметричных спиральных структур [8].

Наблюдается множество типов распада вихрей, но преобладают пузырьковый и спиральный. Спиральный распад, как правило, возникает почти сразу за зоной рециркуляции пузырьвидного распада [10].

Если начальные возмущения малы, то они будут стремиться возбудить свободные возмущения в пограничном слое. Эти свободные возмущения являются нормальными модами пограничного слоя, и их часто называют волнами Толлмина—Шлихтинга. На пограничные слои в воде охлаждение оказывает дестабилизирующее влияние.

Результаты современных теоретических исследований устойчивости пограничного слоя позволяют заключить, что наряду с классическим механизмом по-

тери устойчивости (известным как неустойчивость волны Толлмина—Шлихтинга) возможен еще один линейный механизм нарастания возмущений — так называемый кратковременный рост. Идея предложенного механизма основывается на сохранении жидкой частицей своего импульса в горизонтальном направлении при ее перемещении поперек сдвигового слоя (эффект «опрокидывания», во многом сходный с гипотезой о «пути перемешивания» Прандтля) [11].

Вихревые ядра способны играть роль волноводов, т.е. передавать возмущения. Возмущенные состояния характеризуются широким спектром разнообразных мод — осесимметричных, изгибных и т.д. Основным механизмом, ответственным за распределение таких возмущений, — самоиндуцированное движение.

Характерные свойства реальных концентрированных вихрей демонстрируют сложность и многообразие их поведения, что влечет за собой большие трудности как при математическом описании, так и экспериментальном исследовании. В связи с этим теории концентрированных вихрей базируются преимущественно на приближенных математических моделях. Наиболее распространенный подход к описанию динамики деформированного протяженного вихря заключается в применении закона Био—Савара с использованием приближения тонкой вихревой нити.

Ключевым объектом в теории завихренной жидкости является вихревая нить, которая в наиболее общем виде определяется как вихревая трубка, окруженная жидкостью с нулевой завихренностью. В строгом смысле это определение справедливо только для идеальной жидкости. В реальной жидкости происходит диффузия завихренности, тем не менее для маловязких сред понятие вихревой нити остается полезным и целесообразным.

Для ламинарных вихрей предположительно гауссовское распределение завихренности в ядре, для турбулентных — дробно-степенное.

В случае трехмерных возмущений можно говорить об аналогии между закрученным и стратифицированным потоками, что впервые отметил Рэлей. Но свойства движений вращающейся жидкости существенно сложнее, чем стратифицированной по плотности [12].

Взаимодействие вихревых нитей играет, по-видимому, принципиальную роль в гидродинамике. Полагается, что спиральное спаривание является элементарным взаимодействием.

Возмущения, локализованные в пространстве, в основном представляют собой конический распад вихря. Встречаются и другие типы распада вихря: закрытый пузырьковый, открытый пузырьковый и др.

Образование кратеров на поверхности каменной соли при гидродинамическом воздействии, возможно, происходит при формировании рециркуляционной зоны типа пузырькового распада вихря.

Форма отпечатка (форма вторичного отпечатка) на поверхности кратера [6], напоминает цветок «каллы», представляет конический распад вихря (спиралевидной формы), но при этом только коническая часть изображения «вошла»

в разрушенную часть на поверхности каменной соли (то есть форма каллы имеет вид спирали с конической огибающей).

Эксперименты показали, что конический распад представляет собой структуру, состоящую из двух или более переплетенных спиралей и имеющую коническую огибающую (вращающаяся n -спираль).

В настоящее время нет достаточно полного описания типов возмущений концентрированных вихрей даже на качественном уровне. Нельзя получить адекватное представление об изменениях структуры течения только на основании изучения визуальной картины течения. При исследовании отпечатков вихрей на поверхности каменной соли не фиксируется полная картина динамики вихрей.

На рис. 5 изображены продольные вихри при конвекции в воде под нагретой поверхностью, наклоненной под углом 35° к вертикали. Течение под наклоненной подогреваемой плитой соответствует, например, ветрам, спускающимся по холодной стороне холма и мутным потокам морской воды на дне склона [13]. В литературе [5] приводились примеры образования продольных вихрей и, соответственно, продольных ребер на поверхности каменной соли от их воздействия в процессе массоотдачи.

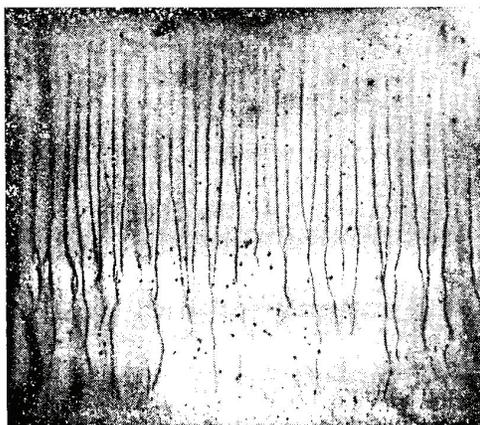


Рис. 5. Продольные вихри при конвекции в воде под нагретой поверхностью, наклоненной под углом 35° к вертикали.

(Краска вводится (электрохимическим способом) равномерно на поверхности пластины)

На рис. 6 приведена пространственная форма линий тока в течении, индуцированном винтовой вихревой нитью [7]. В процессе лабораторного растворения образца зерна каменной соли в стандартной стеклянной емкости, растворитель закручивался с помощью магнитной мешалки, расположенной под дном емкости. При придании вращения жидкости (растворителя) между двумя цилиндрами (между боковыми поверхностями емкости и зерна) на поверхности зерна образуются закрученные винтообразные ребра — отпечатки от воздействия винтообразных вихрей наподобие изображенных на рис. 6.

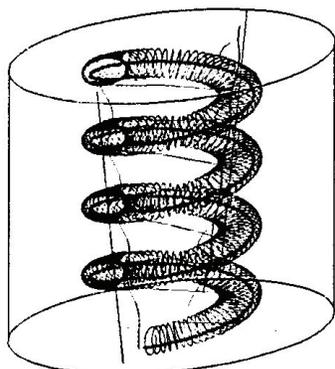


Рис. 6. Пространственная форма линий тока в течении индуцированном винтовой вихревой нитью

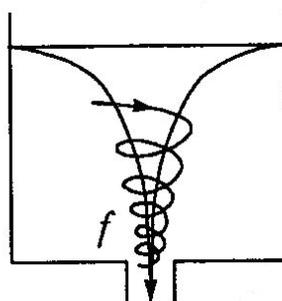


Рис. 7. Форма вдавленной воронки с неровной поверхностью

Источник: [7]

В процессе массоотдачи у поверхности каменной соли образуются различные вихри, которые оставляют отпечатки на поверхности каменной соли. Предлагаются следующие примеры отпечатков на поверхности каменной соли от вихревого воздействия (табл.).

Таблица

Примеры отпечатков на поверхности каменной соли от воздействия концентрированных вихрей

Описание явления
Кратеры — неровности полусферической формы (рис. 3)
Сочетание формы кратера и «каллы». Спиралевидное формообразование с конической огибающей расположено на поверхности полусферической формы
Продольные ребра на наклонных и вертикальных поверхностях (рис. 5)
Сочетание формы кратера и продольных ребер
Сочетание формы кратера, спиралевидного образования и продольных ребер
Закрученные винтообразные ребра (рис. 6)
Форма с неровной поверхностью наподобие воронки жидкости, истекающей из сосуда через донное отверстие (рис. 7) (форма вдавленной воронки с неровной поверхностью). Образуется на поверхности зерна каменной соли при растворении образца в лабораторной установке под давлением

При гидродинамическом воздействии растворителя на поверхность каменной соли происходит образование пограничного вихревого слоя.

Обобщенным явлением гидродинамического воздействия на каменную соль является сосуществование вихревых структур различной формы и размера.

Образующиеся вихревые структуры у поверхности каменной соли интенсифицируют массоперенос приповерхностного слоя жидкости и при разрыве пограничного слоя ускоряют массообмен между поверхностью и основной массой жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бубнов В.К., Воробьев А.Е. и др. Теория и практика добычи полезных ископаемых для комбинированных способов выщелачивания. — Целиноград: Жана-Арка, 1992.
- [2] Воробьев А.Е., Малюков В.П. Применение подземных резервуаров в каменной соли для защиты окружающей среды на газоконденсатном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. — № 9. — 2005. — С. 166—168.

- [3] *Круглов М.Г., Малюков В.П.* Определение поверхности растворения каменной соли при создании подземных хранилищ углеводородов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 1982. — № 3.
- [4] *Kruglov M.G., Maluyukov V.P.* The microgeometry of the dissolution surface of salt rock and mass exchange in underground reservoirs. Solution Mining Research Institute. Meeting papers, Spring 1997. Cracow, Poland.
- [5] *Maluyukov V.P.* Mass transfer in the zone adjacent to the contour of an underground cavern. 8-th World Salt Symposium. Amsterdam. 2000. v. 1.
- [6] *Круглов М.Г., Малюков В.П.* Микрорельеф поверхности растворения каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2002. — № 8.
- [7] *Малюков В.П.* Крупномасштабное моделирование строительства горизонтальных резервуаров в каменной соли при подземном растворении // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 3. — С. 208—212.
- [8] *Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.А.* Введение в теорию концентрированных вихрей. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003.
- [9] *Сэффмэн Ф. Дж.* Динамика вихрей. — М.: Научный мир, 2000.
- [10] *Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К., Подымака М.Ф., Хабенский В.Б.* Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки // Докл. АН СССР. — 1986. — Т. 291. — № 6.
- [11] *Лейбович С.* Распад вихря // Вихревые движения жидкости. — М.: Мир, 1979.
- [12] *Бойко А.В., Грек Г.Р., Сбоев Д.С.* Спектральный анализ локализованных возмущений в пограничном слое при докритических числах Рейнольдса. — Новосибирск, 2002.
- [13] *Владиморов В.А.* О сходстве эффектов плотностной стратификации и вращения // Журнал прикладной механики и технической физики. — 1985. — № 3.
- [14] Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности / Под ред. Х.Л. Суинни, Дж.П. Голлаба. — М.: Мир, 1984.

THE RESEARCH OF SALT ROCK SURFACE DETERIORATION BY THE HYDRODINAMIC EFFECT OF CONCENTRATED WHIRPOOLS

V.P. Malukov

The department of Mining and oil business
People's Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

New phenomena of mass transfer in a boundary turbulent layer during dissolution of the rock salt in the time of underground mines construction.

Малюков В.П., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловой геологии, горного и нефтегазового дела, автор 90 работ в области создания подземных хранилищ газонефтепродуктов в горных породах

