

УДК 622.363.1/2

*В.П. Маликов*

**МАССООТДАЧА КАМЕННОЙ СОЛИ  
ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ  
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ВИХРЕЙ**

*Рассмотрено разрушение каменной соли в процессе растворения при воздействии вихрей, образующихся у поверхности каменной соли.*

Семинар № 4

---

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 натуральных 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 как отпечаток воздействия приповерхностных вихрей. В настоящей работе 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 кон-

центрированными вихрями. Концентрированные вихри – вихревые движения, 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 и поэтому в работе 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 явлений, 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 явления. Для решения подобных задач удастся применить многие идеи, методы и результаты из других областей. Примеры образования концентрированных вихрей приведены на рисунках.

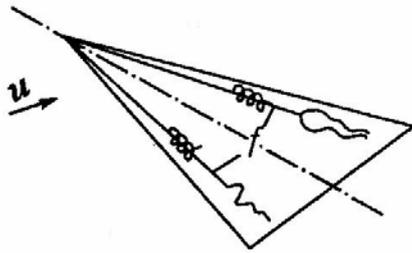


Рис. 1. Обтекание дельтовидного крыла под большим углом атаки (продольные вихри в турбулентном пограничном слое) (из работы [7])

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

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

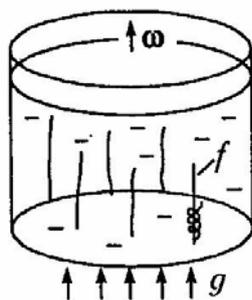


Рис. 2. Система вихревых шнуров во вращающемся слое жидкости, подогреваемой снизу (из работы [7])

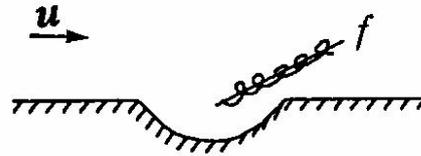


Рис. 3. Вихревые нити при обтекании лункообразной каверны (из работы [9])

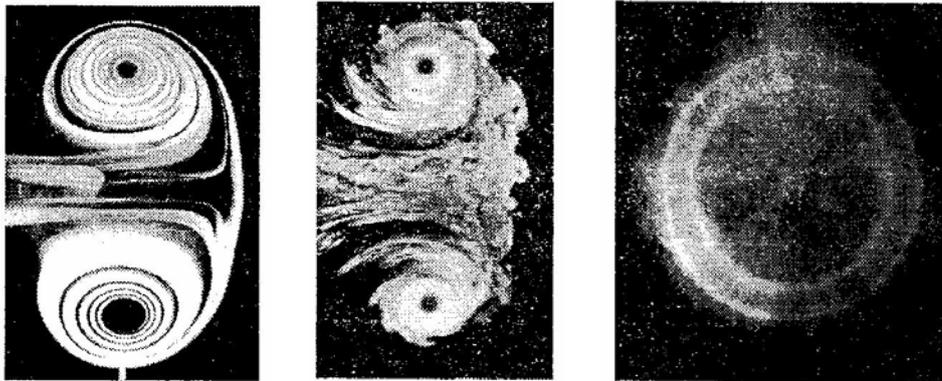
ны. Авторы работы по вихреобразованию при обтекании водой искусственно созданных (техногенных) полусферических лунок [9] назвали эти неровности лунками. В работе [2], при исследовании естественных неровностей полусферической формы, образующихся на поверхности каменной соли при гидродинамическом воздействии растворителя, подобные неровности назвали кратерами. Главным механизмом интенсификации теплообмена на поверхности с лункообразными кавернами является образование протяженных концентрированных вихрей или, как говорят, смерчеобразных структур.

На рис. 4 приведено изображение ламинарных и турбулентных колец.

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.

Анализ динамики концентрированных вихрей позволяет объяснить особенности их взаимодействия друг с другом и с поверхностью каменной соли. В настоящее время вихревая динамика – поле активных исследований.

Теорию пограничного слоя можно рассматривать как сильное взаимодействие между переносом в поле внешнего потока и собственным самоинду-



*Рис. 4. Ламинарные и турбулентные вихревые кольца.*  
Визуализация дымом (из работы [7]).

цированным 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 пузыревидного 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 потери 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 «прокидывания», 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 жид-

кости существенно сложнее, чем стратифицированной по плотности [12].

Взаимодействие вихревых нитей играет, по видимому, принципиальную роль в гидродинамике. При этом полагается, что спиральное спаривание является элементарным взаимодействием.

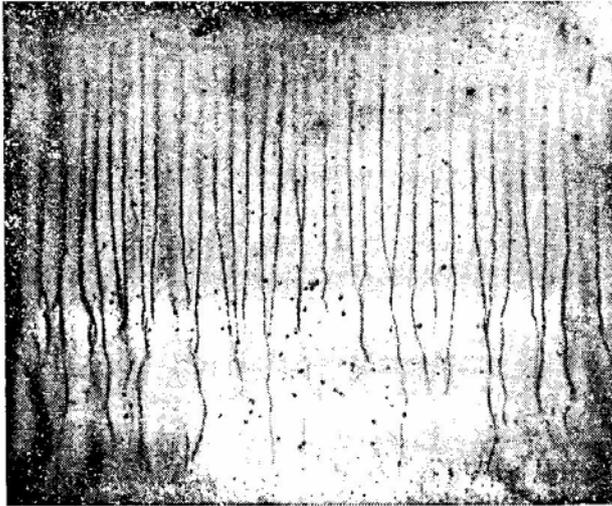
Возмущения, локализованные в пространстве в основном представляют распад вихря. Конический тип распада вихря впервые был обнаружен Alekseenko S. V. и др., а также Khoo B.C. и др. [7], а также другие типы распада вихря: закрытый пузырьковый, открытый пузырьковый и др.

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

По визуальной оценке форма отпечатка на поверхности кратера (форма вторичного отпечатка) [6], которую автор статьи назвал типа цветка «калла» наподобие конического распада вихря (спиралевидной формы), но при этом только коническая часть изображения «вошла» в разрушенную часть на поверхности каменной соли (то есть форма «каллы» наподобие спирали, имеющей коническую огибающую).

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 чем при исследовании отпе-

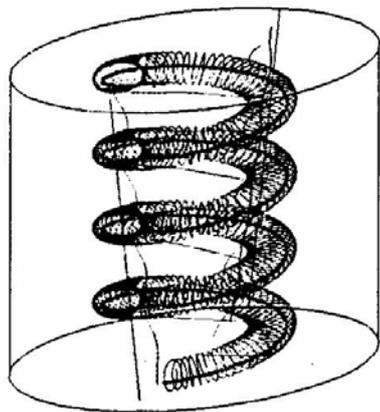


*Рис. 5 Продольные вихри при конвекции в воде под нагретой поверхностью, наклоненной под углом  $35^\circ$  к вертикали.*

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

чатков вихрей на поверхности каменной соли не фиксируется полная картина динамики вихрей.

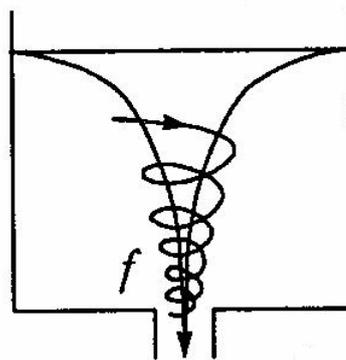
На рис. 5 изображены продольные вихри при конвекции в воде под нагретой поверхностью, наклоненной под углом  $35^\circ$  к вертикали. Течение под наклоненной подогреваемой плитой соответствует, например, ветрам, спускающимся по холодной стороне



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

холма и мутным потокам морской воды на дне склона [13]. В вышеприведенной работе [5] указывались примеры образования продольных вихрей и, соответственно, продольных ребер на поверхности каменной соли от их воздействия в процессе массоотдачи.

На рис. 6 приведена пространственная форма линий тока в течении, индуцированном винтовой вихревой нитью [7]. В процессе лабораторного растворения образца керна 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 керна), на поверхности керна образуются закручен-



*Рис. 7 Форма вдавленной воронки с неровной поверхностью (из работы [7])*

**Примеры отпечатков на поверхности каменной соли от воздействия концентрированных вихрей**

Номер явления	Описание явления
1	Кратеры – неровности полусферической формы (рис. 3)
2	Сочетание формы кратера и «каллы». Спиралевидное формообразование с конической огибающей расположено на поверхности полусферической формы
3	Продольные ребра на наклонных и вертикальных поверхностях (рис. 5)
4	Сочетание формы кратера и продольных ребер
5	Сочетание формы кратера, спиралевидного образования и продольных ребер
6	Закрученные винтообразные ребра (рис. 6)
7	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.

ные винтообразные ребра – отпечатки от воздействия винтообразных вихрей на подобие изображенных на рис. 6.

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.

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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Аренс В.Ж.* Физико-химическая геотехнология. – М.: 2001.
2. *Круглов М.Г., Малоков В.П.* Определение поверхности растворения каменной соли при создании подземных хранилищ углеводородов. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. №3, 1982.
3. *Kruglov M.G., Malyukov 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.
4. *Malyukov V.P.* Mass transfer in the zone adjacent to the contour of an underground cavern. 8-th World Salt Symposium. Amsterdam. 2000. v. 1.
5. *Круглов М.Г., Малоков В.П.* Микро-рельеф поверхности растворения каменной соли – М.: МГГУ, Горный информационно-аналитический бюллетень, 2002, №8.
6. *Малоков В.П.* Крупномасштабное моделирование строительства горизонтальных резервуаров в каменной соли при подземном растворении. ГИАБ. , №3, 2005, с. 208-212.
7. *Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.А.* Введение в теорию концентрированных вихрей. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003.
8. *Сэффмэн Ф. Дж.* Динамика вихрей. – М.: Научный мир, 2000.

9. 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.

10. Лейбович С. Распад вихря // Вихревые движения жидкости. - М.: Мир, 1979.

11. Бойко А.В., Грек Г.Р., Сбоев Д.С. Спектральный анализ локализованных возму-

щений в пограничном слое при докритических числах Рейнольдса. Новосибирск, 2002.

12. Владиморов В.А. О сходстве эффектов плотностной стратификации и вращения // Журнал прикладной механики и технической физики. - 1985. №3.

13. Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности. Под ред. Х.Л. Суинни, Дж. П. Голлаба. – М.: Мир, 1984. **ГИАБ**

### **Коротко об авторе**

Малюков В.П.- кандидат технических наук, доцент Российского университета дружбы народов.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. С.А. Гончаров.



## **ТРЕБОВАНИЯ**

### **К РУКОПИСЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ГОРНОМ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОМ БЮЛЛЕТЕНЕ**

1. Статья должна содержать следующие сведения:
  - аннотацию (не более 300 знаков) на русском и английском языках;
  - ключевые слова;
  - рецензию с указанием данных рецензента (фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание);
  - фамилию, имя, отчество автора (авторов), полное название места работы с указанием почтового адреса, ученую степень и звание, телефон, факс, электронный адрес.
2. Рукопись статьи представляется в одном экземпляре в напечатанном виде с приложением копии (включая рисунки, подрисовочные подписи и таблицы) на любом носителе информации (дискете, CD, DVD) в редакторе Word.
3. На первой странице рукописи проставляется индекс УДК.
4. Статья должна быть подписана авторами.