**1. СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ**

**КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Основной целью дисциплины «Гидравлика» является ознакомление студентов с процессами, используемыми при разработке и эксплуатации сложных гидравлических систем в нефтегазовой отрасли. Изучение курса базируется на знаниях, полученных из курса математики, теоретической механики, физики.

Для успешного освоения курса студенты университета должны изучить теоретический материал, иметь представления о физической сущности изучаемых явлений, а так же научиться решать основные аналитические задачи в соответствии с учебной программой.

Контрольные работы выполняются студентами по результатам самостоятельной работы по изучению курса. Решенные контрольные работы сдаются на проверку преподавателю, защищаются студентом в устной или письменной форме.

Дисциплина «Гидравлика» относится к общепрофессиональному циклу и имеет своей целью изучение основных законов гидромеханики, характеристик и методов расчета простейших гидравлических устройств и трубопроводов применяемых в нефтегазовой отрасли.

Задачи курса – научить будущих специалистов навыкам практического применения знаний гидравлических законов, методик расчета, принципов работы гидроприводов и другого оборудования, применяемого в нефтегазовом хозяйстве.

Полученные знания позволят студентам оценить место и роль специалиста в отраслях промышленности, прогнозировать перспективное направление развития отрасли, оценить роль гидравлики при выполнении расчетов гидравлических систем, при проектировании и эксплуатации систем нефтегазового комплекса, разработке ресурсосберегающих технологий.

**2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ  
 ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

В результате освоения дисциплины студент должен:

- знать общие законы статики и кинематики жидкостей и газов, их взаимодействия с твердыми телами и поверхностями, принцип действия и методы расчета гидравлических машин и оборудования, применяемого в нефтегазовой отрасли;

- уметь применять методы расчета параметров простейших гидромашин, решать задачи, связанные с проектированием и эксплуатацией гидравлических систем применяемых в нефтегазовой отрасли;

- демонстрировать способность и готовность анализировать работу гидравлического оборудования, при необходимости разрабатывать и обосновывать решения по его совершенствованию.

В процессе изучения теоретического материала необходимо ряд вопросов по разделам в соответствии с государственным образовательным стандартом и рабочей программы дисциплины.

*Требования государственного стандарта предусматривают изучение следующих разделов: основные физические свойства жидкостей и газов; основы ки­нематики; общие законы и уравнения статики и динамики жидкостей и газов; одномерные потоки жидкостей и газов; элементы подобия гидродинамических процессов; теория гид­родинамических сопротивлений; реология; потоки вязких жидкостей; основы диффузионного массопереноса; роль гид­равлики в нефтегазовом деле.*

В соответствии с рабочей программой дисциплины студентам следует изучать разделы в указанном объеме и обратить внимание на вопросы. Далее представлены перечень понятий, определений, моделей, законов, на которые следует обратить особое внимание и рекомендации по изучению материала.

2.1. Основные свойства жидкости

Определение жидкости. Силы, действующие на жидкость. Давление в жидкости. Сжимаемость. Закон Ньютона для жидкостного трения. Вяз­кость. Поверхностное натяжение. Давление насыщенного пара жидкости. Изменение свойств жидкости при изменении термодинамических параметров. Растворение газов в жидкости. Модель идеальной жидкости. Неньютонов­ские жидкости.

**Указания и пояснения**. По своим физическим свойствам жидкости занимают промежуточное положение между твердыми телами и газами. Жидкость весьма мало из­меняет свой объем при изменении давления или температуры, в этом от­ношении она сходна с твердым телом. Жидкость обладает текучестью, благодаря чему она не имеет собственной формы и принимает форму того сосуда, в котором находится. В этом отношении жидкость отличается от твердого тела и имеет сходство с газом. Свойства жидкостей и их отличие от твердых тел и газов обусловливаются молекулярным строением. Следу­ет уяснить, каким образом особенности молекулярного строения влияют на физические свойства жидкости.

Покоящаяся жидкость подвержена действию двух категорий внешних сил: массовых и поверхностных. Массовые силы пропорциональны массе жидкости или для однородных жидкостей — ее объему. Внешние поверх­ностные силы непрерывно распределены по граничной поверхности жидкости. Следует знать, какие силы относятся к массовым (объемным) и к поверхностным силам, какие силы называются внешними и какие внут­ренними.

В гидравлике, при изучении законов равновесия и движения, широко пользуются различными физическими характеристиками жидкости (на­пример, плотность). Студенту нужно уметь определять основные физические характеристики жидкости, знать единицы измерения этих характеристик.

Следует также рассмотреть основные физические свойства капельных жидкостей: сжимаемость, тепловое расширение, вязкость и др.

Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление от­носительному перемещению слоев, вызывающему деформацию сдвига. Это свойство проявляется в том, что в жидкости при ее движении возника­ет сила сопротивления сдвигу, называемая силой внутреннего трения. При прямолинейном слоистом движении жидкости сила внутреннего трения Т между перемещающимися один относительно другого слоями с площадью соприкосновения S определяется законом Ньютона.

Динамический коэффициент вязкости  не зависит от давления и от ха­рактера движения, а определяется лишь физическими свойствами жидко­сти и ее температурой. Жидкости, для которых зависимость изменения касательных напряжений от скорости деформации отличается от закона Ньютона, называются неньютоновскими или ано­мальными жидкостями.

Учет сил вязкости значительно осложняет изучение законов движения жидкости. С другой стороны, капельные жидкости незначительно изменяют свой объем при изменении давления и температуры. В целях упрощения постановки задач и их математического решения создана модель идеальной жидкости. Идеальной жидкостью называется воображаемая жидкость, которая характеризуется полным отсутствием вязкости и абсо­лютной неизменяемостью объема при изменении давления и температуры. Переход от идеальной жидкости к реальной осуществляется введением в конечные расчетные формулы поправок, учитывающих влияние сил вяз­кости и полученных, главным образом, опытным путем. При изучении гид­родинамики следует проследить особенности перехода от идеальной жид­кости к реальной.

В гидравлике жидкость рассматривается как сплошная среда (контину­ум), т.е. среда, масса которой распределена по объему непрерывно. Это позволяет рассматривать все характеристики жидкости (плотность, вяз­кость, давление, скорость и др.) как функции координат точки и времени, причем в большинстве случаев эти функции предполагаются непрерыв­ными.

**2.2. Гидростатика**

Свойства давления в неподвижной жидкости. Уравнение Эйлера равно­весия жидкости. Интегрирование уравнения Эйлера. Поверхности равного давления. Свободная поверхность жидкости. Основное уравнение гидро­статики. Закон Паскаля. Приборы для измерения давления. Сила давления жидкости на плоские и криволинейные стенки. Закон Архимеда. Плавание тел. Относительный покой жидкости.

**Указания и пояснения**. Два свойства гидростатического давления обусловлены тем, что по­коящаяся жидкость не воспринимает касательных и растягивающих усилий. Знание этих свойств позволяет понять физический смысл формул ста­тического силового воздействия жидкости на твердые тела.

Наиболее общими уравнениями гидростатики являются дифферен­циальные уравнения Эйлера, устанавливающие связи между массовыми и поверхностными силами, действующими в жидкости. При изучении этих уравнений следует усвоить физический смысл всех входящих в них вели­чин. Эти уравнения позволяют просто и быстро решать задачи как в слу­чае абсолютного покоя жидкости, когда на жидкость из массовых сил дей­ствует только сила тяжести, так и в случае относительного покоя, когда к силе тяжести присоединяются силы инерции. В случае действия на жид­кость одной лишь силы тяжести интегрирование уравнений Эйлера дает основное уравнение гидростатики.

Различают абсолютное, избыточное (манометрическое) и вакуумметрическое давление. Следует знать взаи­мосвязь этих величин.

Весьма важными понятиями в гидравлике являются пьезометрическая высота и гидростатический напор. Пьезометрическая высота выражает в метрах столба жидкости избыточное (или абсолютное) давление в рас­сматриваемой точке жидкости. Гидростатический напор равен сумме гео­метрической *z* и пьезометрической *р/* высот. Для всех точек данного объ­ема покоящейся жидкости гидростатический напор относительно вы­бранной плоскости сравнения есть постоянная величина.

Воздействие жидкости на плоские и криволинейные поверхности наглядно отражается эпюрами давления. Площадь (объем) эпюры дает вели­чину силы давления, а центр тяжести этой площади (объема) — точку приложения силы давления. Аналитическое рассмотрение задачи позволяет получить весьма простые расчетные формулы. В случае плоской по­верхности любой формы величина силы гидростатического давления рав­на смоченной площади этой поверхности, умноженной на гидростатиче­ское давление в центре тяжести площади. Точка приложения силы гидро­статического давления (центр давления) лежит всегда ниже центра тяже­сти (за исключением давления на горизонтальную плоскость, когда они совпадают). Следует указать, что формула для определения координаты центра давления дает точку приложения силы только гидростатического давления без учета давления на свободную поверхность (см. вывод формулы в любом учебнике гидрав­лики).

Для криволинейных цилиндрических поверхностей обычно определяют горизонтальную и вертикальную составляющие полной силы гидростати­ческого давления. Определение вертикальной составляющей связано с по­нятием «тела давления», которое представляет собой действительный или воображаемый объем жидкости, расположенный над цилиндрической по­верхностью. Линия действия горизонтальной составляющей проходит че­рез центр тяжести эпюры давления для проекции криволинейной поверхности на вертикальную плоскость, а линия действия вертикальной составляющей **–** через центр тяжести тела давления.

При изучении этого раздела студенту полезно рассмотреть несколько конкретных примеров построения тел давления для цилиндрических поверхностей, определить самостоятельно вертикальную и горизонтальную составляющие силы давления, точки их приложения и результирующую силу.

Необходимо рассмотреть давление жидкости на стенки труб и резер­вуаров и расчетные формулы для определения толщины их стенок.

**2.3. Кинематика и динамика жидкости**

Виды движения жидкости. Основные понятия кинематики жидкости: линия тока, трубка тока, струйка, живое сечение, расход. Поток жид­кости. Средняя скорость. Уравнение расхода. Дифференциальные уравне­ния движения идеальной жидкости. Уравнение Бернулли для установив­шегося движения идеальной жидкости. Геометрическое и энергетическое толкование уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости. Коэффициент Кориолиса. Общие сведения о гидравлических потерях. Виды гидравлических потерь. Трубка Пито, водомер Вентури.

**Указания и пояснения**. Одним из основных уравнений гидродинамики является уравнение по­стоянства расхода (уравнение неразрывности), которое для плавно изме­няющегося и параллельно-струйного движения может быть представлено в виде *VS = const* (вдоль потока), откуда для двух сечений 1 и 2 получим *V1/V2 = S1/S2,* т.е. средние скорости потока обратно пропорциональны пло­щадям живых сечений.

Дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера дают общую зависимость между скоростями и ускорениями движущихся частиц жидкости и силами, действующими на эти частицы. Интегрирова­ние этих уравнений для элементарной струйки идеальной жидкости при­водит к основному уравнению гидродинамики **–** уравнению Бернулли, ко­торое можно получить также и непосредственно, применив к бесконечно малому объему жидкости теоремы механики, например теорему живых сил.

Уравнение Бернулли представляет собой частный случай закона сохранения энергии. Все члены уравнения Бернулли отнесены к единице веса жидкости, поэтому все виды энергии в этом уравнении имеют линейную размерность. При рассмотрении уравнения Бернулли для простейшего случая движения элементарной струйки невязкой (идеальной) жидкости следует уяснить геометрический и физический (энергетический) смысл уравнения в целом и его отдельных членов, а также обратить внимание на условия применимости уравнения Бернулли к элементарной струйке.

При распространении уравнения Бернулли для элементарной струйки на поток реальной жидкости возникает ряд трудностей, которые пре­одолеваются введением соответствующих ограничений и поправок. Урав­нение Бернулли составляется для двух живых сечений потока, в которых течение параллельно-струйное или плавно изменяющееся. Живые сечения здесь плоские, поэтому отсутствуют ускорения вдоль живых сечений, а из массовых сил действует только сила тяжести. Следовательно, в этих сече­ниях (участках) справедливы законы гидростатики, в частности, постоян­ство гидростатического напора для всех точек живого сечения относи­тельно любой плоскости сравнения. Между плавно изменяющимися тече­ниями (участками) потока, связанными уравнением Бернулли, поток мо­жет быть и резко изменяющимся. При определении кинетической энергии потока по средней скорости в данном сечении вводится поправка в виде коэффициента Кориолиса *α ,* учитывающего неравномерность распределе­ния скоростей по живому сечению.

При решении практических инженерных задач уравнение Бернулли и уравнение постоянства расхода используются совместно. При этом они составляют систему из двух уравнений, позволяющую решать задачи с двумя неизвестными.

Если для струйки идеальной жидкости уравнение Бернулли пред­ставляет собой закон сохранения механической энергии, то для потока ре­альной жидкости оно является уравнением баланса энергии с учетом гид­равлических потерь. Гидравлическими потерями называется работа сил трения, затраченная на перемещение единицы веса жидкости из одного сечения в другое. Энергия потока, израсходованная на работу сил трения, превращается, в тепловую энергию и рассеивается в пространстве.

**2.4. Режим движения жидкости**

Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости. Число Рейнольдса.

**Указания и пояснения**. Для использования уравнения Бернулли при решении практических инженерных задач необходимо знать гидравлические потери (потери на­пора), имеющие место при движении жидкости. Эти потери в зна­чительной степени зависят от того, будет ли режим движения в потоке турбулентным или ламинарным.

Наличие того или иного режима в трубопроводе обусловливается соот­ношением трех факторов, входящих в формулу безразмерного критерия Рейнольдса.

При изучении режимов движения жидкости следует уяснить различия в структуре потоков. Нужно знать формулу числа Рейнольдса и его критическое значение, отчетливо представлять его физический смысл.

Критерий Рейнольдса пред­ставляет собой отношение сил инерции к силам трения. Теперь можно бо­лее глубоко разобраться в физическом смысле числа или критерия Рейнольдса: режимы движения жидкости и переход одного режима в другой объясняются преобладанием силы инерции или силы трения в потоке, т. е. величиной *Re*. Как будет видно из дальнейшего, многие величины, харак­теризующие движение жидкости, могут быть представлены как функции *Re*.

**2.5. Ламинарное движение жидкости**

Распределение скоростей по сечению круглой трубы. Потери напора на трение по длине трубы (формула Пуазейля). Начальный участок потока. Ламинарное движение в плоских и кольцевых зазорах. Особые случаи ла­минарного течения (переменная вязкость, облитерация).

**Указания и пояснения**. В ламинарном потоке частицы жидкости движутся слоями с различными скоростями параллельно оси трубы без перемешивания. В таком потоке касательные напряжения подчиняются закону Ньютона. Используя общий закон распределения касательных напряжений и закон Ньютона, можно получить дифференциальное уравнение, из которого строго мате­матически выводятся основные закономерности ламинарного движения: распределение скоростей по живому сечению трубопровода; максималь­ная и средняя скорости; коэффициент Кориолиса *α*; закон сопротивления трения (формула Пуазейля); коэффициент гидравлического трения *λ* в формуле Дарси**–**Вейсбаха.

Теоретические результаты хорошо подтверждаются опытом для пото­ков, в которых отсутствует теплообмен с окружающей средой.

**2.6. Турбулентное движение жидкости**

Особенности турбулентного движения жидкости. Пульсация ско­ростей и давлений. Распределение осредненных скоростей по сечению. Касательные напряжения в турбулентном потоке. Потери напора в тру­бах. Формула Дарси**–**Вейсбаха и коэффициент потерь на трение по длине (коэффи­циент Дарси). Шероховатость стенок абсолютная и относительная. Гра­фики Никурадзе и Мурина. Гидравлически гладкие и шероховатые тру­бы. Формулы для определения коэффициента Дарси и область их приме­нения. Турбулентное движение в некруглых трубах.

**Указания и пояснения**. Турбулентный поток характеризуется беспорядочным, хаотичным движением частиц жидкости. Из-за сложности явлений до сих пор не создано достаточно удовлетворительной теории турбулентного движения, которая непосредственно вытекала бы из основных уравнений гидродинамики и хорошо подтверждалась опытом (как для ламинарного движения). Поэто­му все выводы и расчетные соотношения получены экспериментально и в результате теоретического исследования упрощенных моделей турбулент­ного течения.

Прежде всего, следует уяснить механизм турбулентного перемешивания и пульсации скоростей. Далее рассмотрите, структуру и физическую при­роду касательных напряжений, которые определяются как сумма напря­жений, вызванных действием сил вязкости и обусловленных турбулент­ным перемешиванием. Определение последних основано на полуэмпири­ческих теориях Прандтля и Кармана, получивших дальнейшее развитие в трудах Дарси**–**Вейсбаха.

Потери на трение по длине определяются по формуле Дарси**–**Вейсбаха, которая может быть получена из соображений размерности.

Центральным вопросом темы является определение коэффициента гид­равлического трения *λ* в формуле Дарси**–**Вейсбаха. В общем случае коэффициент *λ* является функцией числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости *kэ/d.*Наиболее полно зависимость раскрывается графиком Никурадзе, который получен экспериментально на трубах с искусственной зернистой равномерной шероховатостью. На графике можно выделить пять зон, ка­ждая из которых характеризуется определенной внутренней структурой потока и в соответствии с этим определенной зависимостью *λ* от Rе и *kэ/d*.

Как показали более поздние исследования, результаты экспериментов Никурадзе для «гидравлически шероховатых» труб нельзя перенести на трубы с естественной шероховатостью. Оказалось, что в четвертой и пятой зонах общий характер зависимости сохраняется, но вид кривых на гра­фике зависит от характера шероховатости стенок труб.

Аналитически коэффициент гидравлического трения λ определяется по формулам Альшуля, Блазиуса, Шифринсона.

**2.7. Местные гидравлические сопротивления.**

Основные виды местных сопротивлений. Коэффициент местных сопро­тивлений. Местные потери напора при больших числах Рейнольдса. Вне­запное расширение трубы (теорема Борда). Диффузоры. Сужение трубы. Повороты, Тройники. Местные потери напора при малых числах Рейнольдса. Эквива­лентные длины труб. Кавитация в местных гидравлических сопротивлени­ях.

**Указания и пояснения**. Местные сопротивления представляют собой короткие участки трубо­проводов, на которых происходят изменения величины и направления скоростей потока, вызванные изменением размеров и формы сечения тру­бопровода. Потери энергии в местных сопротивлениях, отнесенные к единице веса протекающей жид­кости, называются местными потерями напора. Потери в местных сопро­тивлениях делятся на потери трения и вихревые потери. Следует рассмотреть, как эти факторы проявляются в конкретных местных сопротивлени­ях.

В общем случае коэффициент местного сопротивления ξ (в формуле для определения потерь в местных сопротивлениях) зависит от формы ме­стного сопротивления, относительной шероховатости стенок, распределе­ния скоростей в граничных сечениях потока перед местным сопротивле­нием и после него и от чисел Рейнольдса. Следует уяснить, как эта общая зависимость конкретизируется для различных зон турбулентного течения и при ламинарном течении. Отметим, что в технических установках в большинстве случаев имеет место турбулентный режим, соответствующий зоне квадратичного сопротивления, где коэффициент *ξ* не зависит от *Rе* и где проявляется автомодельность. Если в трубопроводе до и после местного сопротивления имеет место ламинарный режим (жидкости с по­вышенной кинематической вязкостью), то в местных сопротивлениях, как правило, возникает турбулентное течение.

Весьма существен вопрос о взаимном влиянии местных сопротивле­ний. Простое суммирование потерь в местных сопротивлениях (так назы­ваемый принцип наложения потерь) дает правильные результаты, если сопротивления расположены друг от друга на расстоянии, превышающем длину взаимного влияния, составляющую *(30÷ 40)d.*

**2.8. Истечение жидкости через отверстия и насадки**

Истечение жидкости через отверстия в тонкой стенке при постоянном на­поре. Коэффициенты сопротивления, сжатия, скорости, расхода. Истече­ние жидкости через цилиндрический насадок. Насадки различного типа. Истечение при переменном напоре. Понятие о струйной технике.

**Указания и пояснения**. Отверстие называется малым, если можно пренебречь изменением давления по его площади. Насадками называются небольшие по длине трубы ~ *l* = (**…**)*d*, присоединенные к таким отверстиям. Прежде всего сле­дует уяснить характер и особенности движения жидкости в процессе ис­течения (сжатые струи, образование вакуума).

В гидравлике истечения через отверстия и насадки есть много общего. Скорость истечения и вытекающий расход рассчитываются по общим формулам, выведенным на основе уравнения Бернулли, причем потери при истечении определяются как местные потери. Общими являются так­же гидравлические характеристики (коэффициенты расхода, скорости, сжатия, сопротивления).

Следует знать физический смысл коэффициентов сжатия, скорости и расхода, зависимость их числовых значений от типа и формы отверстий и насадок и от критерия Рейнольдса. Нужно также обратить внимание на то, что при Rе *> 105* влияние сил вязкостного трения на коэффициенты ис­течения практически отсутствует (квадратическая зона сопротивления). При этом коэффициенты истечения зависят только от формы отверстий и насадков. Это позволяет с успехом использовать отверстия с острой кром­кой и с насадками в качестве измерителей расхода.

При истечении при переменном напоре (опорожнение сосудов) расчет­ными являются формулы для определения времени опорожнения.

**2.9. Гидравлический расчет трубопроводов**

Основное расчетное уравнение простого трубопровода. Виды и методы гидравлического расчета. Понятие об оп­ределении экономически наивыгоднейшего диаметра трубопровода. Сифонный трубопровод. Последовательное и параллельное соединение тру­бопроводов. Сложные трубопроводы. Трубопровод с насосной подачей.

**Указания и пояснения**. Для гидравлического расчета трубопроводов применяются уравнение Бернулли, формулы для определения потерь напора на трение по длине и в местных сопротивлениях, уравнение постоянства расхода.

Для нахождения различных гидравлических характеристик трубо­проводов применяются расчетные таблицы. К числу основных гидрав­лических характеристик относится расходная характеристика.

В зависимости от гидравлической схемы работы и от методов гидрав­лического расчета различают трубопроводы короткие и длинные, простые и сложные, разветвленные и замкнутые, с транзитными и путевыми расхо­дами жидкости. Следует уяснить различие между перечисленными типами трубопроводов и особенности их гидравлических расчетов. Все случаи расчета простых трубопроводов сводятся к трем типовым задачам по оп­ределению: 1) расхода, 2) напора, 3) диаметра трубопровода. Следует знать методику решения этих задач.

При расчете сложных трубопроводов составляется система уравнений, которые устанавливают связь между размерами труб, расходами жидкости и напорами. Эта система состоит из уравнений баланса расходов для каж­дого узла и уравнений баланса напоров (уравнений Бернулли) для каждой ветви трубопровода.

**2.10. Неустановившееся движение жидкости**

Неустановившееся движение несжимаемой жидкости в жестких трубах с учетом инерционного напора. Явление гидравлического удара. Формула Жуковского для прямого удара. Понятие о непрямом ударе. Способы ос­лабления гидравлического удара.

**Указания и пояснения**. Интегрирование дифференциального уравнения неустановившегося движения жидкости в напорном трубопроводе в предположении, что тру­бы обладают абсолютно жесткими стенками, а жидкость несжимаема, приводит к уравнению Бернулли с инерционным слагаемым, которое учитывает напор, затраченный на преодоление локальных сил инер­ции, т.е. сил инерции, обусловленных ускорением (или замедлением) все­го объема жидкости в трубопроводе. В случае плавно изменяющегося движения локальные ускорения определяются по изменению средних ско­ростей в сечениях потока. Для параллельно-струйного движения (трубо­провод постоянного сечения) локальное ускорение в каждый момент вре­мени одинаково для всех сечений потока, т. е. жидкость условно представ­ляется как твердое тело.

Если ускорения в потоке достаточно велики, то предположение о неуп­ругости системы становится неприемлемым. Учет упругих свойств жидко­сти и стенок трубопровода приводит к рассмотрению процесса распро­странения вдоль трубопровода упругих волн деформации и связанных с ними волн резкого повышения и понижения давления, приводит к явле­нию гидравлического удара.

Гидравлическим ударом называется повышение или понижение дав­ления в напорном трубопроводе, вызванное изменением во времени (в не­котором сечении трубопровода) скорости движения жидкости. Явление гидравлического удара было теоретически и экспериментально изучено в конце XIX в. Н. Е. Жуковским в связи с многочисленными авариями мос­ковского водопровода.

Гидравлический удар чаще всего возникает в случае быстрого закрытия или открытия затвора, управляющего потоком в трубопроводе. Различают прямой удар, когда время закрытия затвора меньше фазы гидравлического удара (время пробега ударной волны от затвора к резервуару и обратно), и непрямой удар, при котором время закрытия затвора больше фазы гидрав­лического удара.

Формула Н. Е. Жуковского *P = СV* дает зависимость величины удар­ного повышения давления *P* от плотности жидкости **, скорости распро­странения ударной волны *С*, уменьшения скорости в трубе перед краном вследствие его закрытия *V*. Формула применима для расчета прямого и непрямого удара и учитывает как сжатие жидкости, так и растяжение сте­нок трубы при ударном повышении давления.

После уяснения физической сущности гидравлического удара и ме­тодов его расчета следует рассмотреть меры борьбы с ним.

**2.11. Взаимодействие потока со стенками**

Воздействие струи на твердые преграды. Силы воздействия потока на стенки.

**Указания и пояснения.** Настоящий раздел необходим для понимания принципа действия гид­равлических машин. Следует хорошо разобраться в физической и механической сущности активного и реактив­ного взаимодействия между струёй и твердой преградой, и сопротивлении твердых тел, движущихся в жидкости.

**2.12. Теория подобия**

Гидродинамическое подобие. Геометрическое подобие. Кинематическое подобие. Динамическое подобие. Критерии Рейнольдса, Эйлера, Фруда, Струхаля. Основные принципы анализа размерностей. π-теорема.

**Указания и пояснения.** В гидравлике широко применяется метод моделирования, когда иссле­дуется не само явление или установка, а их модель, обычно меньших раз­меров. Основой моделирования является теория гидродинамического подобия.

Для установившегося движения однородных несжимаемых жидкостей необходимым и достаточным условием гидродинамического подобия яв­ляется геометрическое, кинематическое и динамическое подобие потоков. Следует четко представлять содержание этих частичных критериев подо­бия. Для полного гидродинамического подобия необходима пропорцио­нальность всех сил, действующих в потоке, но подобие по одним силам часто исключает подобие по другим силам. Поэтому считается достаточ­ным получение приближенного подобия по силам, преобладающим в дан­ном потоке. Критериями такого подобия являются критерий Рейнольдса (преобладание сил трения), критерий Фруда (силы тяжести), критерий Эй­лера (силы давления).

Каждая физическая величина характеризуется размерностью. Различают первичные и вторичные величины размерности. Совокупность размерностей принято записывать в виде формулы размерностей. Величины с нулевой размерностью обладают важным свойством инвариантности по отношению к метрическим преобразованиям, их значение не меняется при переходе к другим единицам измерения.

В π-теореме Бэкингема утверждается, что число безразмерных комплексов, характеризующих исследуемый процесс равно числу всех величин, существенных для процесса, за вычетом числа первичных величин.

**2.13. Основы диффузионного массопереноса**

Молекулярная диффузия. Законы Фика. Турбулентная диффузия. Диффузионный массоперенос в силовом поле. Бародиффузия и термодиффузия. Испарения.

**Указания и пояснения.** Молекулярная диффузия представляет собой процесс переноса массы вещества соприкасающихся газов, жидкостей и твердых тел за счет непрерывного хаотического движения молекул. Скорость диффузии зависит от градиента концентраций вещества и коэффициента диффузии.

Первый закон Фика позволяет определить потока массы вещества через единицу поверхности в единицу времени. Второй закон Фика связывает уравнение диффузии и закон сохранения массы.

Турбулентная диффузия представляет собой процесс переноса вещества при турбулентном перемешивании и определяется гидродинамическим состоянием потока. Развитие турбулентного режима приводит к интенсивному поперечному переносу вещества и перемешиванию в потоке.

Процесс переноса вещества, вызванный градиентом давления, называется бародиффузией, вызванный градиентом температуры - термодиффузией. Под действием внешних сил в жидкостях и газах могут иметь место и другие виды диффузии. Например, в электролитах и плазме при наличии разности потенциалов происходит электродиффузия.

**3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

**Пример 1.** Определить свойства (плотность, вязкость, давление насыщенных паров) (в СИ) дизельного топлива для хранения на нефтебазе, при критических температурах +42 и -23 °С, βt=0,000841 1/К, ν20 = 5 сСт , ν40 = 3,1 сСт, ρ20=845кг/м3 , Рs38 = 11мм.рт.ст.

**Решение**

1.*Плотность:*

Расчет производим по формуле Д.И.Менделеева:

,

где  - плотность нефтепродукта соответственно при температурах Т и 293К; - коэффициент объемного расширения;

Плотность дизельного топлива ДЗ ρ293=845 кг/м3,=0,000841 1/К:

 кг/м3,

 кг/м3.

*2.Вязкость:*

Расчет производим по формуле Рейнольдса-Филонова:

,

где ν, ν\* - кинематическая вязкость соответственно при температурах Т и Т\*, м2/с; u – показатель крутизны вискограммы, 1/К:

.

Коэффициент крутизны вискограммы:



 м2/с,

 м2/с.

*3.Давление насыщенных паров:*

РS (по Рейду) для нефтепродуктов при температуре Тмах, с достаточной точностью определяется по формуле:

,

где Р38 – давление насыщенных паров нефтепродукта по Рейду.

Давление насыщенных паров дизельного топлива ДЗ:

Р38=11мм.рт.ст.=1466,3 Па:

.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис.3.1. Схема к примеру 2** |

Пример 2. Найти избыточное давление в сосуде *А* с водой по пока­заниям многоступенчатого двухжидкостного ртутного манометра (рис. 3.1): *h1 =* 82 см; *h2* = 39 см; *h3* = 54 см; *h4 =* 41 см; *h5 =* 100 см; *ρв*=103кг/м3; *ρр*=1,36·104 кг/м3.

**Решение**

Так как жидкость находится в равновесии, то давления в точке *1* и в точке *2* равны как давления в точках одного и того же объе­ма однородной покоящейся жидкости, расположенных на одной горизон­тали, т.е. *р1 = р2.* На том же основании *р3 = р4*, *р5 = р6 .* В то же время избыточное давление







Исключив из этих соотношений промежуточные давления *p*2, *p*4, *p*6, получим:

*рА* = *ρрg*[*(h1 – h2) + (h3 – h4 )*] *— ρвg*[*(h3 - h2 ) +* (*h5 - h*4)] = =1,36·104·9,8 (0,43+0,13) - 103·9,8 (0,15 + 0,59) = 67,4 кПа.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис.3.2. Схема к примеру 3** |

**Пример 3.** Определить давление на забое закрытой газовой скважины (рис. 3.3), если глубина скважины *Н* = 2200 м, манометрическое давление на устье *рм* = 10,7 МПа, плотность природного газа при атмосферном давлении и температуре в скважине (считаемой неизменной по высоте) *ρ* = 0,76 кг/м3, атмосферное давление *ра* = 98 кПа.

**Решение**

Для определения давления на забое газовой скважины воспользуемся барометрической формулой



В нашей задаче *р0* – абсолютное давление газа на устье скважины

*р0* = *ра* + *рм* = 9,8 · 103 + 10,7 · 106 =

= 10,8 · 106 Па;

*ρ0* – плотность при давлении *р0*, а *z0* – *z* = 2200 м.

Из уравнения состояния газа следует, что

 с2/м2,

а показатель степени:



Тогда

*р* = 10,8 · 106 · *е* 0,167 = 12,8 МПа.

**Пример 4.** Вертикальная стенка (рис.3.3) длиной *l* =3 м (в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа), шириной *b =* 0,7 м и высотой *H0* = 2,5 м разделяет бассейн с водой на две части. В левой части поддерживается уровень воды *H1* = 2 м, в правой *— Н2**=* 0,8 м.

Найти величину опрокидывающего момента, действующего на стенку, а также определить, будет ли стенка устойчива против опрокиды­вания, если плотность материала стенки *ρст =* 2500 кг/м3.

###### **Решение**

Найдем силу давления воды на стенку слева. Так как на поверхности давление атмосферное, то пьезометрическая плоскость совпадает с поверхностью жидкости

|  |
| --- |
|  |
| **Рис.3.3. Схема к примеру 4** |

*рт* *– ра = pg* *,*

*Р*1 *= pg* *lН1**=* 103·9,8·2/(2·3·2)=58,8·103 Н = 58,8 кН.

Координата центра давления

*lD1 = lт + J/lт s.*

Для прямоугольной стенки *J* = , тогда

 м.

Точно так же справа:

****кН,

****м.

Опрокидывающий момент, т.е. момент сил давления жидкости относительно точки *О* (см. рис. 5.1.12):

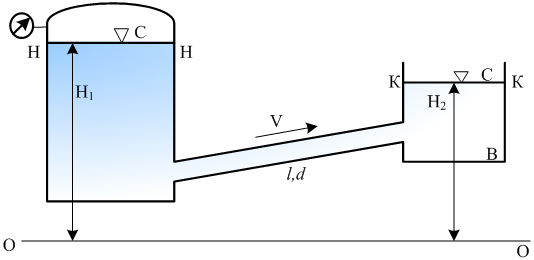
 Н·м.

Устойчивость против опрокидывания сообщает стенке момент силы тяжести относительно точки *О:*

 Н·м.

Так как *Мтяж* > *Мопр*, то стенка устойчива.

**Пример 5.** Вода поступает из резервуара *А* в резервуар *В* по трубопроводу длиной *l = 5 м* , диаметром *d = 50 мм* . Показания манометра составляет *РМ = 0,3 ат.* Скорость движения воды в трубопроводе   
*V = 4 м/с.* Если известно, что *Н1 = 4 м,* а  *Н2 = 3 м,* коэффициент гидравлического трения *λ = 0,035.* Построить напорную и пьезометрическую линии. Рассчитать гидравлический и пьезометрический уклоны (рис. 3.4).



**Рис. 3.4**

Порядок построения:

1. Записать уравнение Бернулли для начального (*Н - Н*) и конечного (*К - К*) сечений, плоскость сравнения *О – О* (рис. 26)

 . (1)

1. Определить параметры, входящие в уравнение Бернулли для начального и конечного сечений:

*ZH = H1;ZK = H2;*

*PHизб = PM ; PKизб = 0;*

*VH ≈ 0; VK ≈ 0.*

1. Определить полные гидродинамические напоры в начальном и конечном сечениях:



 .

1. Рассчитать потери напора на каждом сопротивлении:

а) потери напора на вход в трубопровод:

.

б) потери напора по длине трубопровода:

.

в) потери напора на выходе из трубопровода в резервуар:

.

1. Определить суммарные потери напора:

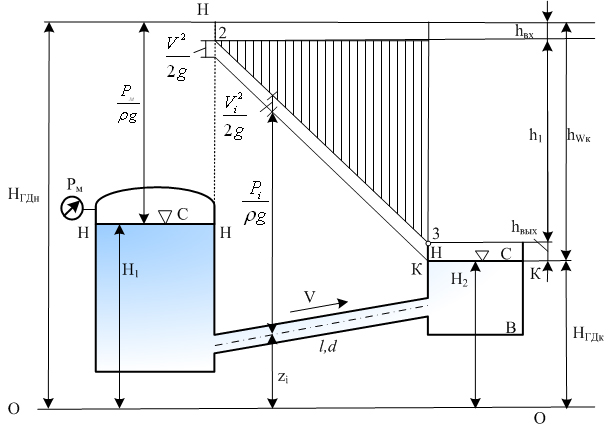
.

1. Выполнить проверку по уравнению (1):



*4 = 4*

1. Выбрать масштаб и отложить все составляющие напора для начального и конечного сечений, показать полные гидродинамические   
   напоры –  (рис. 3.5).



**Рис. 3.5**

1. Построить напорную линию (*Н – 2 – 3 – Н*). Для этого необходимо последовательно вычитать потери напора, нарастающие вдоль потока, из полного гидродинамического напора в начальном сечении. Показать потери напора на каждом сопротивлении и общие потери напора – *h Wн-к  .*
2. Построить пьезометрическую линию (*Р – Р*), характеризующую изменение гидростатического напора потока – *HSi* . Для этого необходимо в каждом сечении из полного напора потока вычесть величину соответствующего скоростного напора.
3. Рассчитать величину гидравлического уклона:

 (2)

Гидравлический уклон *J* – характеризует изменение полного гидродинамического напора по длине или отношение суммарных потерь напора к длине трубопровода, т.е.:

 . (3)

Для нашего случая рассчитаем гидравлический уклон:

 ;

.



1. Рассчитать пьезометрический уклон – *Jp*

 (4)

Пьезометрический уклон характеризует изменение гидростатического напора по длине трубопровода.

Для рассматриваемого случая:



; .

Вывод:

1) Т.к. *J = Jp* , следовательно, напорная линия и пьезометрическая линия располагаются параллельно;

2) Т.к. *Jp>0*, следовательно, пьезометрическая линия нисходящая.

**Пример 6.** Два одинаковых цилиндрических резервуара заполнены жидкостью до уровня h каждый и имеют донные отверстия площадью f1 и f2, коэффициенты расхода которых равны μ1 и μ2 соответственно. Отверстия открываются одновременно.

Определить уровень *у* в нижнем резервуаре в тот момент, когда верхний резервуар будет полностью опорожнен. Найти *у* в частном случае, когда μ1 = μ2 и f1 = f2, h=1м.

**Решение**

Так как расход Q находится в зависимости от напора h:

,

то соответственно с уменьшением уровня в резервуаре будет уменьшаться и расход. Поэтому введем понятие среднеарифметического расхода . При истечении через отверстие время полного опорожнения резервуара Т составит:

|  |
| --- |
|  |
| **Рис.3.6. Схема к примеру 6** |

,

где V – начальный объем жидкости в резервуаре, м; – средний расход за рассматриваемое время опорожнения, .

Расход жидкости из нижнего резервуара:

#### 

Т. к. сосуды имеют призматическую форму то средние расходы можно определять как среднеарифметические.

Расход из верхнего резервуара

#### 

Расход из нижнего без учета верхнего:

#### 

Время опорожнения верхнего резервуара

#### 

За это же время будет происходить изменение уровня в нижнем резервуаре



Приравняем последние два уравнения



Т.к.  и  , то



| возведем в квадрат.

| примем, что .



, тогда

, 

Принимаем =0,38м.

Ответ: 0,38м.

**Пример 7.** Выполнить гидравлический расчет нефтепровода, если длина его *L* = 600км, производительность *G* = 34 млн.т/год. Заданы вязкость и плотность нефти: *ρ20* = 852 кг/м3; *ν20* = 48 сСт; *ν50* = 22 сСт, толщина стенки 9 мм, рекомендуемый технологическими нормами наружный диаметр – 1020мм, число рабочих дней в году – 349, насос НМ 500-210, напор основного насоса при заданной производительности - 160м, подпорного – 123 м, насосы соединены последовательно, в схеме 3 основных и 1 подпорный насос. Расчетная температура нефти *t* =7 оС, минимальная температура нефти в трубопроводе.

**Решение**

1. Определение плотности нефти при заданной температуре

 кг/м3.

2. Определение вязкости нефти при *tр*

 сСт,

.

3. Определение расчетной производительности

, м3/час,

 м3/час = 1,31 м3/с.

4.Рабочее давление  МПа.

7. Режим течения нефти в нефтепроводе

.

8. Определяем число Рейнольдса

; ;

.

турбулентный режим, зона Блазиуса .

9. Скорость и гидравлический уклон

,  м/с;

10. Потери напора на трение в нефтепроводе по формуле Дарси-Вейсбаха  **м.**

**3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

Задание на контрольную работу выдается преподавателем на установочной лекции. Вариант задания **v** выбирается по последним двум цифрам шифра зачетной книжки студента.

**Задачи для контрольной работы**

**Задача 6.** Из большого резервуара с тонкими стенками при постоянном уровне H=(4,5+0,1∙v)м над отверстием, через отверстие d0=30мм вытекает вода. Определить скорость истечения и расход воды.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Гидравлика и гидромашины. [Текст]: учебное пособие с грифом УМО/ Земенков Ю.Д. [и др.] – Тюмень: «Вектор-Бук», 2009 – 400с.
2. Потемина Т.П. Гидравлика [Текст]: учебно - методический комплекс/ Т.П.Потемина, Н.А. Кудрявцева. – Тюмень, ТюмГНГУ, 2004 – 136с.
3. Транспорт и хранение нефти и газа в примерах и задачах (раздел «Общая гидравлика»).[Текст]: учебное пособие с грифом УМО/ ред.Ю.Д. Земенкова. - Санкт-Петербург: «Недра», 2004-544 с.
4. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод [Текст] : учебное пособие для студентов вузов/ Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева ; ред.: С. П. Стесин. - 2-е изд., стер. - М.: Академия, 2006. - 336 с.
5. Ухин Б.В., Гусев А.А. Гидравлика. [Текст]: учебник для вузов – М.: Инфра-М, 2008. - 432 с.
6. Земцов В.М. Гидравлика. [Текст]: учебник для вузов – М.: АСВ, 2007.-352с.
7. Лапшев Н.Н. Гидравлика. [Текст]: учебник для вузов – М.: Изд.дом «Академия», 2007.-272с.
8. Штеренлихт Д.В.Гидравлика. [Текст] :учебник для вузов.– М.: КолосС, 2007. – 656с. Кудинов В.А. Гидравлика. [Текст]: учебник для вузов/ Кудинов В.А., Карташов Э.М. – М.Высш.шк., 2007. – 199с.

Составители: М.Ю. Земенкова, к.т.н., доцент,

Ю.Д. Земенков, профессор, д.т.н.

И.В. Тырылгин, ассистент,

К.С. Воронин, ассистент

|  |  |
| --- | --- |
| Подписано к печати  Заказ №  Формат 60х84 1/16  Отпечатано на RISO GR 3750 | Бум. писч. №1  Уч.изд.л.  Усл.печ.л.  Тираж 36 экз. |

# **Издательство «Нефтегазовый университет»**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Тюменский государственный нефтегазовый университет»

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38

Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52