



Предисловие для преподавателей

Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными, и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то, какое утверждение, составленное из наименьшего числа слов, принесло бы наибольшую информацию?
Я считаю, что это – атомная гипотеза: все тела состоят из атомов - маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольших расстояниях, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому. В одной этой фразе ...содержится **НЕВЕРОЯТНОЕ** количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения.

Ричард. Фейнман

Уважаемые коллеги!

Вы, наверно, находитесь в недоумении, какое отношение имеют к гидромеханике вынесенные в эпиграф слова нобелевского лауреата великого Ричарда Фейнмана. Ведь традиционный университетский курс гидромеханики основывается на гипотезе сплошной среды и идеальной несжимаемой жидкости, выводе дифференциальных уравнений движения и их последующему интегрированию для некоторых частных случаев. В этом курсе нет закона Гука, пренебрегают сжимаемостью жидкости и вообще не интересуются строением вещества.

Эта книга есть результат использования автором атомной гипотезы в приложении к гидромеханическим параметрам и процессам. Я попыталась, по совету всемирно известного ученого и педагога, «приложить немного воображения и чуть соображения» к объяснению поведения макроскопических параметров гидромеханических систем, и на этой основе научить своих студентов Методу, то есть указать им путь к системному анализу гидромеханических процессов и решению практических задач.

В предисловии хотелось бы донести до Вас, уважаемые коллеги, свое видение проблемы преподавания гидромеханики и причины, которые побудили меня создать компьютерную технологию обучения гидромеханике и написать эту книгу.

Сначала несколько слов о состоянии проблемы.

Согласно существующим учебным планам обучение студентов гидромеханике сводится к выводу на лекциях математических моделей движущейся и покоящейся жидкости, и к применению этих моделей для решения узкого круга практических задач. Основная цель – научить студента получать численный результат решения гидромеханической задачи возможно более коротким способом. Для упрощения расчетов введены такие понятия, как: система избыточных давлений, пьезометрическая плоскость, тело давления, напор, гидравлический уклон, потери напора.

В результате такого подхода расчетные уравнения имеют простой вид, однако из механики жидкости практически исчезли исконно физические базовые понятия силы, напряжения, энергии, работы и другие. Современный вузовский курс гидромеханики представляет собой, по существу, дисциплину, в которой к строгим математическим соотношениям добавлены опытные формулы для определения потерь напора на преодоление гидравлических сопротивлений.

Между тем многолетний опыт автора и, я уверена, Ваш опыт, уважаемые коллеги, свидетельствуют о неудовлетворительном результате такого обучения. На кафедре нефтегазовой и подземной гидромеханики РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина в течение ряда лет проводится Всероссийская олимпиада по гидравлике. Так вот, на последней олимпиаде в 2007 году семь (7!) участников не решили ни одной задачи! А ведь на олимпиаду приезжают лучшие, специально подготовленные студенты, и такой «результат» явный сигнал о неблагополучии в нашем «датском королевстве»....

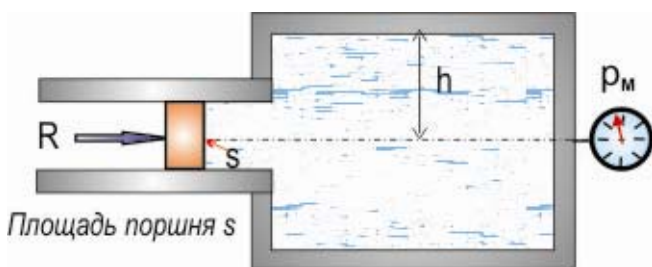
Попытаемся выявить глубинные причины такого положения дел.

При анализе существующих подходов к преподаванию отдельных разделов курса гидромеханики и поиске причин неудач в результатах обучения будем исходить из рекомендаций Джеймса Кларка Максвелла, который особо настаивал на необходимости всегда использовать именно «такой прием исследования, при котором мы могли бы сопровождать каждый свой шаг ясным физическим изображением явления». Это позволяет, по его мнению, «прийти к представлению о внутренней связи всех явлений», что, несомненно, и означает наличие **Метода**, как в научном исследовании, так и в преподавании (передаче существующих знаний).

1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА

Основным понятием гидростатики является гидростатическое давление, которое трактуется в механике сплошной среды как отношение силы нормального давления к площади её действия. Тот факт, что давление в точке по всем направлениям одинаково, следует из рассмотрения равновесия выделенного объема жидкости в виде треугольной призмы. Зависимость давления от глубины жидкости (основное уравнение гидростатики) выводится из уравнений Эйлера.

Результат



Студенты не понимают, что такое давление в точке внутри жидкости, ведь там не видно ни силы, ни площади. Соответственно, они не могут использовать свойства давления при решении задач.

Непонимание приводит к тому, что студенты складывают воздействия на одном и том же уровне. Например, типичная ошибка: показание

манометра равно не R/s , а $R/s + \rho gh$!

Что делать?

Предлагается трактовать понятие «абсолютное гидростатическое давление в точке внутри жидкости» как **внутреннее** сжимающее напряжение¹, которое зависит от расстояния между молекулами. Как известно из молекулярной физики, в жидкости существует «ближний порядок». То есть вследствие текучести жидкости расстояния между молекулами могут изменяться в течение времени t «оседлой жизни молекулы» ($O(t) = 10^{-8}$ с). Относительные флуктуации этого расстояния имеют порядок $1/\sqrt{N}$, где N - число частиц (10^{25} - 10^{28} атомов/м³). При осреднении расстояния во времени наблюдения, которое много больше, чем 10^{-8} с, и получается, что среднее расстояние не меняется, и давление остается постоянным по всем направлениям, равно как и во всех точках горизонтальной плоскости².

¹ Здесь термин «напряжение» понимается в механическом смысле, как величина, напрямую связанная с деформацией и расстоянием между молекулами. В механике сплошной среды напряжение есть просто отношение соответствующей силы к площади действия (нормальное напряжение, касательное напряжение).

² Речь, конечно же, идет о ньютоновской жидкости.

Для вывода основного уравнения гидростатики можно использовать или уравнение равновесия выделенного объема жидкости, или закон сохранения энергии. Представляется, что соответствующий вывод из уравнений Эйлера имеет ряд методических недостатков:

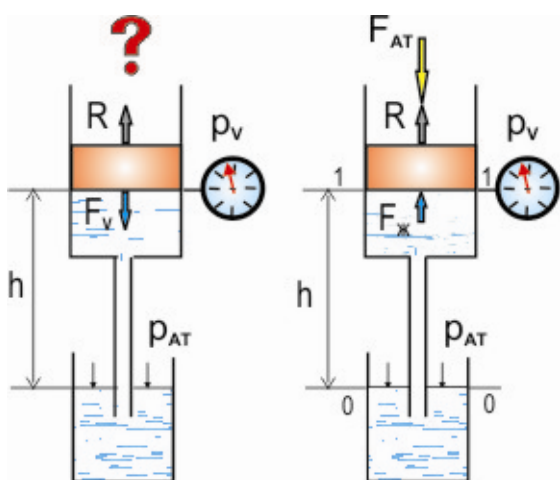
- Требует предварительного ознакомления студентов с понятиями «серьезной» математики: разложение функции в ряд, частная производная, полный дифференциал, скалярное произведение и др.
- Требует хорошего понимания физической природы сил (поверхностных и массовых) и формул для их выражения.
- Является затратным по времени, а коэффициент его использования очень мал (вывод распределения давления по высоте в жидкости и газе, и распределения давления при относительном покое). Все эти уравнения могут быть чрезвычайно просто получены с использованием уравнений равновесия или закона сохранения энергии для каждой конкретной ситуации (что и сделано в этом учебном пособии).

Некоторые преподаватели гидромеханики не рассказывают студентам сами необходимые вводные сведения из математики и физики, а ограничиваются следующими пояснениями: «Это вы «проходили» в первом семестре, а это во втором (или в десятом классе школы)...». Стоит ли удивляться после этого, когда студент на вопрос «Что такое X^3 ?», отвечает, что это координата...

2. СИСТЕМА ИЗБЫТОЧНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Для упрощения расчетных формул в гидромеханике широко используется система избыточных давлений. Цитирую⁴: «Технические задачи удобнее решать, используя избыточное давление $p_{изб}$, т.е. когда за начало шкалы принимается атмосферное давление – $0_{изб}$. Давление, которое отсчитывается «вниз» от атмосферного нуля называется давлением вакуума $p_{вак}$, или вакуумом. Связь между абсолютным давлением и давлением вакуума: $p_{абс} = p_{ат} - p_{вак}$ ».

Результат



Во-первых, налицо явное смешение понятий. В физике «вакуум» означает **состояние** объема газа или жидкости, в котором давление меньше атмосферного. Резонно при этом под давлением вакуума понимать именно абсолютное давление. Как следует из вышеприведенной цитаты, в гидромеханике под давлением вакуума понимают показание вакуумметра.

К чему это приводит? Рассмотрим процесс подъема жидкости в цилиндр поршневого насоса. Необходимо определить силу R , действующую на поршень.

Преподаватель говорит студенту: «Под поршнем вакуум. Давление вакуума равно: $p_v = \rho gh$, это давление показывает вакуумметр. На поршень действует сила

вакуумметрического давления $F_v = \rho g h s$.

Из условия равновесия поршня сила $R = F_v = \rho g h s$.»

Формально задача решена верно. Однако, что это за «сила вакуумметрического давления»?

³ Проекция равнодействующего ускорения массовых сил на ось x .

⁴ А.В. Лепешкин, А.А. Михайлов Гидравлические и пневматические системы.- М.: АCADEMA, 2005, с.8.

В физике под термином **сила** понимают меру взаимодействия двух тел. Судя по левому рисунку, на жидкость со стороны поршня действует сила, направленная вверх, то есть жидкость растянута, и в ней обязаны при этом возникнуть растягивающие напряжения, то есть отрицательное давление! Как известно, в реальной жизни жидкость практически всегда находится в сжатом состоянии, и в ней возникают сжимающие напряжения, которые и называются абсолютным гидростатическим давлением. При снижении этого давления до давления насыщенного пара, которое в справочниках дается как абсолютное, наступает явление кавитации. Разросшиеся пузырьки пара разрывают межмолекулярные связи, поток теряет сплошность, и процесс всасывания прекращается⁵.

Таким образом, получается, что силы вакуумметрического давления в природе не существует! Более того, «изгнание» из практики решения задач абсолютного давления и недонесение до студентов его физического смысла не позволяет обучить студентов **пониманию** процессов, происходящих в жидкости, и правильно решать более сложные задачи. Например, если в системе есть газ, давление которого (абсолютное!) определяется из уравнения Клапейрона - Менделеева, студенты почти всегда ошибаются (из практики Всероссийской олимпиады).

Что делать?

- При решении задач во все формулы первоначально подставлять абсолютное давление, которое можно далее выразить через показания мановакуумметра по формулам пересчета.
- Обязательно рассказывать о принципе работы механических мановакуумметров. В существующих учебниках упор делается на жидкостные приборы. На фоне «изгнания» абсолютного давления многие студенты под показанием механического мановакуумметра понимают именно то давление, которое есть в жидкости, другого они просто не знают.
- Показывать на схемах «живые» силы. Их можно пересчитать по пальцам, их физическое происхождение студенты должны понимать, чтобы их «увидеть» и правильно расставить на чертеже.
- Методически обоснованное решение задачи, рассмотренной выше.

1. На поршень действуют:

Сила давления жидкости $F_{\text{ж}} = p_1 s = (p_{\text{ат}} - \rho gh) s$;

Сила атмосферного давления $F_{\text{ат}} = p_{\text{ат}} s$;

Внешняя сила R (реакция связи).

2. Уравнение равновесия поршня:

$$F_{\text{ж}} + R - F_{\text{ат}} = 0;$$

$$(p_{\text{ат}} - \rho gh) s + R - p_{\text{ат}} s = 0;$$

$$R = \rho g h s.$$

3. Показание вакуумметра:

$p_{\text{в}} = p_{\text{ат}} - p_1$ - по определению, следует из принципа работы прибора, откуда $p_1 = p_{\text{ат}} - p_{\text{в}}$.

$p_1 = p_{\text{ат}} - \rho gh$ - следствие основного уравнения гидростатики.

Приравниваем абсолютные давления снизу и справа, согласно свойству абсолютного давления:

$$p_{\text{ат}} - p_{\text{в}} = p_{\text{ат}} - \rho gh; \quad p_{\text{в}} = \rho gh.$$

⁵ Подробно о кавитации и об отрицательном давлении можно почитать в разделе 1 учебного пособия.

Слов нет, решение получилось существенно длиннее. Однако оно физически «прозрачное» и подчиняется системе, по которой решаются любые механические задачи:

1. Выявить действующие силы и расставить их на чертеже.
2. Выразить силы по соответствующим формулам, согласно их физическому происхождению.
3. Записать уравнение равновесия и определить из него неизвестную величину. Атмосферное давление не должно влиять на параметры гидродинамического процесса (если нет газа в системе), и в конечном итоге должно сократиться.

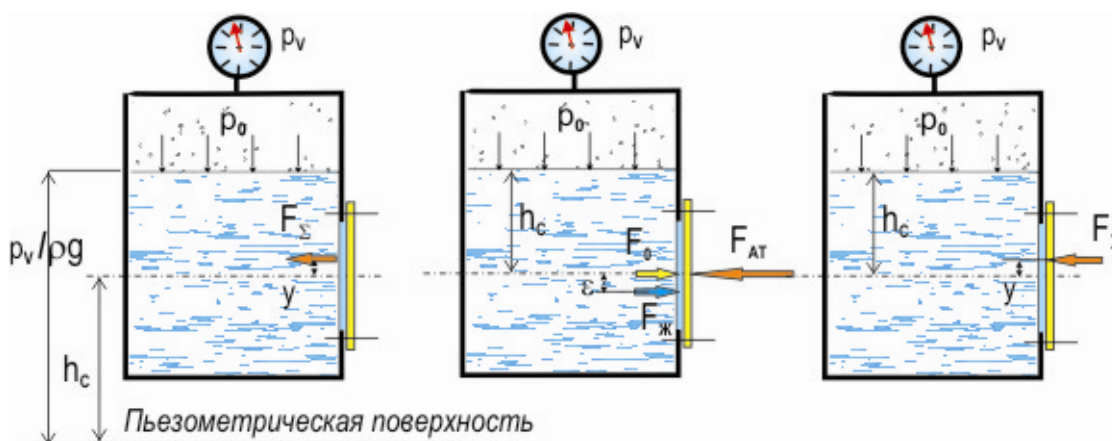
3. ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКАЯ ПЛОСКОСТЬ

Используется для упрощения расчетов при определении сил давления жидкости на плоские и криволинейные поверхности.

Для открытого сосуда атмосферное давление уравнивается для всех поверхностей внутри и снаружи, поэтому равнодействующая сила равна силе давления столба жидкости. Модуль этой силы, направление и точка пересечения с плоскостью стенки определяются по правилам теоретической механики и обычно не вызывают затруднений.

Если давление на свободной поверхности не равно атмосферному (закрытый сосуд или на поверхность жидкости действует через поршень внешняя сила), возникла идея заменить избыток или недостаток давления над атмосферным на поверхности столбом жидкости соответствующей высоты. При этом задача сводится к открытому сосуду с новым положением свободной поверхности, определяется сразу равнодействующая сила по готовым формулам и решение получается очень компактным.

Результат



Левая схема на рисунке демонстрирует применение пьезометрической поверхности. Сила давления на крышку равна произведению давления воображаемого столба жидкости высотой h_c на площадь и легко определяется. «Знак минус» (сила направлена от стенки), поскольку центр тяжести крышки расположен выше пьезометрической поверхности. Есть готовая формула для определения в этом случае координаты y .

Всё замечательно! Но для кого – для преподавателя, который решил самостоятельно не одну задачу и «набил руку» на этой методике. Несомненно, в этом случае целью обучения является «натаскивание» студентов на решение конкретного типа задач, потому как понять, почему надо брать давление столба жидкости НИЖЕ центра тяжести крышки без предварительного настроя невозможно.... И потом, что это за сила? Ведь жидкость сжата в реальной жизни и давит НА стенку, а не тянет её к себе. Все эти вопросы появляются у любого здравомыслящего человека, который видит такую картинку. Сила одна, она, как известно, есть мера взаимодействия

между жидкостью и стенкой. Математика, конечно, великая вещь, но мы все-таки мыслим категориями реальности, которые нам предоставляет Природа.

Что делать?

Предлагается разделить силовое воздействие на две части: воздействие от давления столба жидкости, и от внешнего давления на свободной поверхности.

Необходимо выявить в каждой конкретной задаче реальные силы, действующие с обеих сторон стенки, определить их линии действия и, далее равнодействующую силу по правилам теоретической механики.

На свободной поверхности жидкости в разных задачах действует:

- атмосферное давление,
- давление газа (может быть большим или меньшим атмосферного),
- давление от внешней силы (передаваемое через поршень) и атмосферное давление.

Во всех случаях это давление передается по закону Паскаля через жидкость на крышку, и одинаково во всех точках крышки. Следовательно, сила внешнего давления F_0 всегда проходит через центр тяжести поверхности. Модуль этой силы равен произведению абсолютного давления на свободной поверхности жидкости и площади стенки. Сила ВСЕГДА направлена на стенку, так как в реальных жидкостях отрицательные давления создать невозможно из-за начала процесса парообразования.

Сила давления столба жидкости и линия её действия определяется обычным способом, исходя из положения реальной свободной поверхности в конкретной задаче.

На рисунке показаны три силы, в общем случае сил может быть четыре, по две с каждой стороны стенки.

Предлагается следующая методика решения подобных задач:

➤ Анализируем задачу, выявляем действующие на поверхность силы, и расставляем их на чертеже. В общем случае действуют две силы внешнего давления и две силы давления столба жидкости.

➤ Определяем модули сил и линии их действия.

$F_0 = p_0 s$ - сила внешнего давления;

$F_{AT} = p_{AT} s$ - сила атмосферного давления;

$F_{Ж} = \rho g h_C s$ - сила давления столба жидкости.

Силы внешнего и атмосферного давлений проходят через центр тяжести стенки, а сила давления столба жидкости – через центр давления.

➤ Определяем модуль равнодействующей силы и линию её действия по правилам теоретической механики.

В данном случае мы заменяем три силы одной силой, которая производит такое же действие. Для определения координаты y (см. рисунок) применяем теорему Вариньона: «Момент равнодействующей силы относительно произвольной оси (точки) равен сумме моментов составляющих сил относительно той же оси (точки)». В качестве точки для составления уравнения моментов удобно взять центр тяжести стенки. В этом случае моменты от сил внешнего давления равны нулю и мы получаем:

$F_{Ж} \cdot \varepsilon = F_{\Sigma} \cdot y$, откуда определяется координата y .

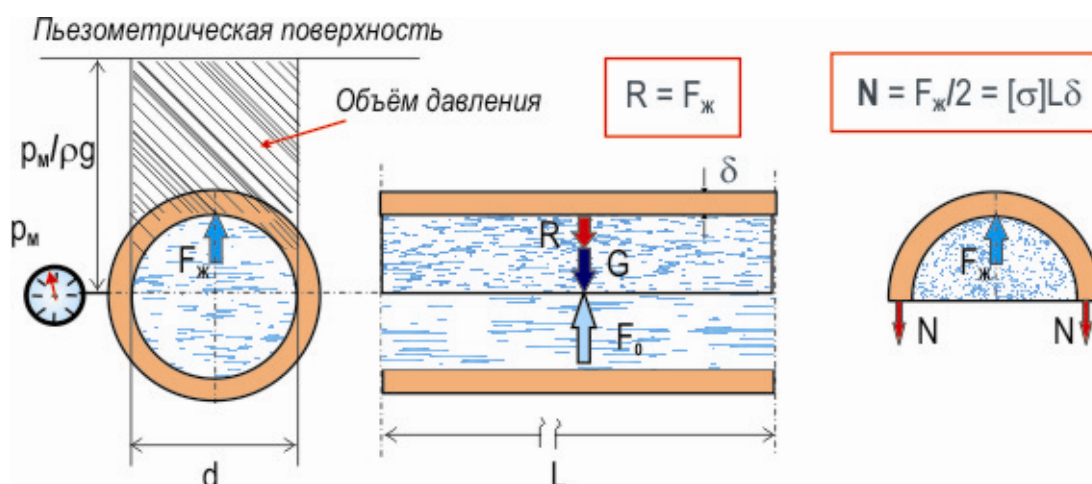
Следует отметить, что в реальной жизни гидромеханическая сила давления редко представляет самостоятельный интерес. На практике, при расчете и конструировании элементов гидравлических систем, кроме гидромеханической силы давления на поверхности клапанов, затворов, стенок напорных резервуаров действуют и другие силы (тяжести, упругости пружины, реакции связей и т.д.). Поэтому представляется правомерным и методически обоснованным применять для определения гидромеханических сил общие правила теоретической механики, а не специально изобретенные в механике сплошной среды математические модели.

4. ОБЪЁМ ДАВЛЕНИЯ

Раздел гидростатики «Определение сил давления на криволинейные поверхности», вне сомнения, является самым трудным для студентов. Задачи из этого раздела традиционная гидромеханика предлагает решать опять таки с использованием понятия «пьезометрическая поверхность», к которому добавляется ещё и «правило для определения объёма давления». Это правило, как известно, используется для определения вертикальной составляющей силы давления жидкости на криволинейную поверхность.

Выше уже было сказано о тех сложностях, которые привносит в практику решения задач понятие пьезометрической поверхности. Если давление в жидкости существенно меньше атмосферного, эта плоскость уходит «глубоко в землю» (то есть пьезометрическая плоскость располагается ниже уровня, на котором находится резервуар с жидкостью). Далее, для определения объёма давления нужно проектировать криволинейную поверхность на эту экзотическую плоскость, и вычислять объём, который получился в результате. Если криволинейная поверхность имеет сложную форму, приходится определять объёмы давления по частям, потом их алгебраически складывать, и определять знак суммарного объёма, чтобы показать направление силы. Задача не для слабонервных....

Между тем никакой необходимости в такой сложной методике нет. В этом учебном пособии предлагается для каждой конкретной задачи использовать для определения сил давления на криволинейную поверхность тот же прием, который, собственно, и «породил» понятие объёма давления. А именно: **рассмотреть равновесие объёма жидкости** под действием нескольких сил, одной из которых является **реакция** криволинейной поверхности. По 3-му закону Ньютона эта реакция равна искомой силе давления, но направлена противоположно ей.



На этом рисунке представлена расчетная схема для решения важной практической задачи: определение минимальной толщины стенки трубы, находящейся под действием избыточного

давления жидкости. Для определения толщины стенки δ из уравнения $\delta = \frac{F_{ж}}{2[\sigma]L}$ (здесь σ - до-

пускаемое напряжение на разрыв), необходимо определить силу $F_{ж}$ – вертикальную составляющую силы давления жидкости на криволинейную поверхность.

Эта сила равна реакции криволинейной поверхности на давление жидкости, и определяется из условия равновесия жидкости в объеме полуцилиндра (выделен на схеме):

$$F_0 - R - G = 0.$$

$$G = \rho g \frac{\pi d^2 L}{2 \cdot 4} - \text{вес жидкости в объеме полуцилиндра};$$

$$F_0 = p_M \cdot d \cdot L - \text{реакция сжатой жидкости снизу};$$

$$R = F_0 - G = p_M \cdot d \cdot L - \rho g \frac{\pi d^2 L}{2 \cdot 4} = \rho g \left(\frac{p_M \cdot d \cdot L}{\rho g} - \frac{\pi d^2 L}{8} \right) = \rho g W,$$

где W - объем давления, заштрихован на левом рисунке.

Конечно, в данной конкретной задаче никаких сложностей в определении объема давления нет, и ответ можно получить сразу, если применить правило для определения объема давления. Однако же и определение искомой силы из уравнения равновесия жидкости ничуть не сложнее. А преимущества налицо – используется метод, хорошо знакомый студентам из механики твердого тела и теоретической механики, и студенту не нужно тратить время и резервировать «место в памяти» для запоминания некоего частного правила в отдельной дисциплине.

5. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ - УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Это уравнение является своеобразным символом прикладной гидромеханики, и все, что с ним связано, чрезвычайно важно.

В учебниках по гидромеханике уравнение Бернулли получают двумя способами:

- Выводятся дифференциальные уравнения движения, которые затем интегрируются⁶.
- Применяется к выделенному объёму жидкости теорема «живых сил» - теорема об изменении кинетической энергии⁷.

Второй способ более распространен, и именно так выводил свое уравнение сам Д. Бернулли. Для решения задач уравнение Бернулли представляется в виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} + h_{1-2}, \quad (\text{а})$$

$$\text{или } (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2 - \alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} = h_{1-2}. \quad (\text{б})$$

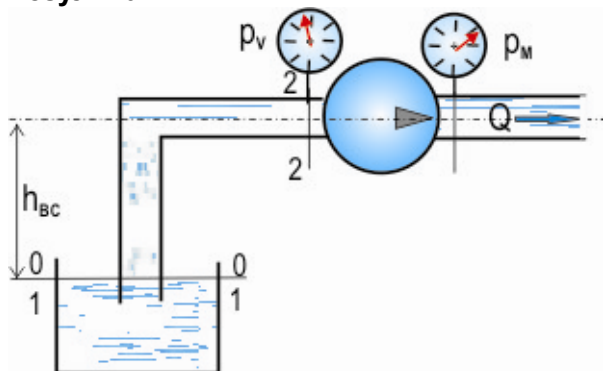
После вывода уравнения Бернулли вводится очень много новых понятий со словом «напор»: геометрический, пьезометрический, скоростной, гидростатический, гидродинамический, полный.... Напор определяется как энергия единицы веса жидкости. В уравнение Бернулли рекомендуется подставлять избыточное давление, так как атмосферное давление в обеих частях уравнения сокращается.

⁶ Под редакцией Башта Т.М. Гидравлика, гидравлические машины и гидроприводы. – Москва.: Машиностроение, 1982.

⁷ Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Недра, 1978.

Обязательно приводится энергетическая трактовка этого уравнения, причем величина $p/\rho g$ называется потенциальной энергией давления без всяких дополнительных пояснений.

Результат



На рисунке представлена типичная схема для расчета всасывающей линии насосной установки.

Применение уравнения Бернулли в виде (а):

$$0 + 0 + 0 = h_{\text{вс}} - \frac{p_v}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \cdot Q_2^2}{2g} + h_{1-2},$$

откуда определяется неизвестная величина.

Все замечательно, неизвестная величина определится верно, если постоянно «держать в голове» нужную информацию о знаках z и p .

При использовании уравнения (б) без предварительного выбора плоскости сравнения, практически неизбежна ошибка студента в знаке $(z_1 - z_2)$.

Между тем думающий человек может задать преподавателю вопросы:

- Уравнение Бернулли - закон сохранения энергии. В сечении 1-1 энергия равна нулю. За счет чего жидкость поднимается вверх?
- p_v – показание прибора. Каким образом показание прибора попало в уравнение, представляющее собой закон сохранения энергии для жидкости, движущейся по трубе? А если прибора не будет, значит ли это, что и закон сохранения энергии записать нельзя?
- Известно, что высота всасывания насоса ограничена. Как можно объяснить этот факт на основании уравнения Бернулли в записанном виде? (другого уравнения у нас нет).

Констатируем: Уравнение Бернулли представляет собой математическую модель движущейся жидкости. Вывод этого уравнения, а также использование системы избыточных давлений не проясняют физического смысла его слагаемых, и, следовательно, сводят к минимуму возможность анализа с его помощью гидродинамических процессов.

Что делать?

➤ Потенциальная энергия давления

Предлагается априори вести в рассмотрение потенциальную энергию давления жидкости. Это энергия, которая запасается в жидкости вследствие её сжатия внешними силами. Она, как и само давление, напрямую зависит от расстояния между молекулами⁸, об этом подробно говорится и в этом учебном пособии. Потенциальная энергия давления⁹ определяется по формуле

$E_p = \frac{mp}{\rho}$, которая получена двумя способами: во введении и в параграфе 5.3.

⁸ Иванов Б.Н. Законы физики, М.: Едиториал УРСС, 2004.

⁹Физический смысл потенциальной энергии давления проясняется во введении, где жидкость рассматривается как термодинамическая система.

После этого суммарную энергию объёма жидкости массой dm в сечении элементарной струйки можно записать так:

$$dE = dmgz + \frac{dmp}{\rho} + \frac{dmu^2}{2},$$

и далее закон сохранения энергии для струйки жидкости (пренебрегая потерями в первом приближении), и уравнение Бернулли:

$$dmgz_1 + \frac{dmp_1}{\rho} + \frac{dmu_1^2}{2} = dmgz_2 + \frac{dmp_2}{\rho} + \frac{dmu_2^2}{2};$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g}.$$

После интегрирования по сечению и учета потерь энергии получаем закон сохранения энергии для потока реальной жидкости:

$$mgz_1 + \frac{mp_1}{\rho} + \frac{\alpha_1 m v_1^2}{2} = mgz_2 + \frac{mp_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 m v_2^2}{2} + \Delta E.$$

Потенциальная энергия давления определяется по величине абсолютного давления, и при решении задач в уравнение Бернулли нужно изначально подставлять абсолютное давление.

Так, для всасывающей линии насоса имеем:

$$\frac{mp_{AT}}{\rho} = mgh_{BC} + \frac{mp_2}{\rho} + \frac{\alpha_2 \cdot m v_2^2}{2} + \Delta E.$$

Из схемы задачи ясно видно, что в начальном сечении жидкость сжата силой атмосферного давления, за счет этого в сечении 1-1 давление в жидкости равно атмосферному, и в ней устанавливается некое расстояние между молекулами, соответствующее ему.

При включении двигателя рабочее колесо насоса начинает вращаться, центробежная сила отбрасывает жидкость от центра к периферии, расстояния между молекулами в центре увеличиваются, и на входе в насос давление становится меньше атмосферного. Между сечениями 1-1 и 2-2 создалась разность давлений, и жидкость начинает двигаться.

При движении вверх часть потенциальной энергии атмосферного давления превращается в потенциальную энергию положения (жидкость поднимается на высоту h_{BC}).

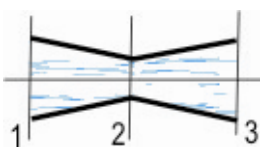
Еще одна часть превращается в кинетическую энергию, и жидкость приобретает скорость v_2 . Ещё одна часть энергии атмосферного давления тратится на преодоление гидравлических сопротивлений (ΔE).

В результате всех этих энергетических затрат давление уменьшается, и молекулы жидкости в сечении 2-2 «разжимаются» по сравнению с сечением 1-1 ровно настолько, чтобы расстояние между ними соответствовало давлению p_2 . Это давление, разумеется, меньше атмосферного, и при определенном значении параметров: высоты всасывания h_{BC} , расхода Q , диаметра трубы d может стать равным давлению насыщенного пара и начнется явление кавитации....

Не правда ли, зримую картинку я нарисовала, уважаемые коллеги? Конечно, все эти «сжимания – расжимания» происходят на молекулярном уровне, и увидеть их невозможно. Однако представить себе такую механическую модель движущейся жидкости при использовании зако-

на сохранения энергии для анализа реальных гидромеханических процессов студенты вполне могут, и она, на мой взгляд, оказывается очень полезной.

◆ Связь между давлением и скоростью



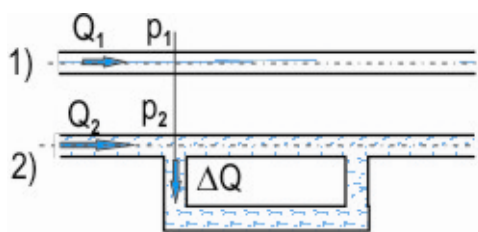
Характер изменения давления в трубе переменного сечения обычно трактуется на основании уравнения Бернулли: если скорость увеличивается, то давление уменьшается (одно слагаемое увеличивается, другое «обязано» уменьшаться, чтобы сумма осталась прежней).

Такая чисто математическая зависимость не удовлетворяет «думающих» студентов, и я им предлагаю другое объяснение.

При движении жидкости от сечения 1 к сечению 2 её скорость увеличивается, то есть каждый следующий «слой» молекул движется быстрее, и поэтому расстояния между слоями увеличиваются по ходу движения, следовательно, давление уменьшается.

При движении от сечения 2 к сечению 3 все происходит наоборот.

◆ Феномен лупинга



всасывающий эффект лупинга:

$$p_2 < p_1 \Rightarrow Q_2 > Q_1$$

При расчете лупинга с помощью уравнения Бернулли студенты обычно недоумевают: почему в суммарные потери напора нужно подставлять потери по длине только по одной из параллельных труб? Приходится записывать закон сохранения полной энергии, выносить за скобку удельные потери по параллельным трубам, далее делить все слагаемые на вес и переходить к удельным энергиям. Кстати сказать, это как раз тот случай, когда математические преобразования физической модели (переход к удельной энергии и упрощение уравнения) приводят к утере физического смысла.

Между тем объяснение этого эффекта с помощью «атомной гипотезы Р. Фейнмана» очевидно и видно «невооруженным глазом». Отвод части жидкости по параллельной трубе приводит к тому, что в сечении молекул стало меньше, расстояние между ними увеличилось, и давление уменьшилось, а скорость увеличилась. Возник своеобразный всасывающий эффект, который и привел к увеличению расхода¹⁰.

◆ Гидравлический уклон

Это понятие широко используется при решении задач транспорта жидкостей по магистральным трубопроводам постоянного диаметра. В курсе гидромеханики, когда в общем случае жидкость движется по трубопроводу переменного сечения, гидравлический уклон также есть величина переменная, так как он представляет собой банальную производную от полного напора (или от потерь на трение) по длине трубы, которая пропорциональна скорости движения.

Введение нового имени вместо стандартного названия «производная функции» приводит к тому, что студенты считают гидравлический уклон постоянной величиной, присущей собственно жидкости при её перемещении по трубе, и рисуют напорную линию в виде падающей ПРЯМОЙ линии в трубопроводе любой геометрии. Хотя, как показано в учебном пособии в разделе «Диаграмма Бернулли», эта линия будет выпуклой в сужающейся трубе и вогнутой в расширяющейся.

¹⁰ Подобное явление возникает при присоединении к отверстию в стенке насадка, когда удается с его помощью снизить давление в сжатом сечении струи и тем самым, за счет «всасывающего» эффекта увеличить расход вытекающей жидкости.

➔ Определение коэффициента гидравлического трения при турбулентном режиме

В прикладных задачах расчета трубопроводов многие преподаватели требуют от студентов предварительного определения зон турбулентного режима (гидравлически гладкие, шероховатые и абсолютно шероховатые трубы), и последующего применения для коэффициента гидравлического трения формул для каждой зоны (например, формул Блазиуса, Альтшуля и Никурадзе соответственно).

Между тем расчеты во всех случаях можно производить по обобщенной формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta \varepsilon}{d} \right)^{0,25} \text{ с достаточной для практики точностью (5\%).}$$

То слагаемое, которое мало в данных условиях, дает и незначительный вклад в величину коэффициента трения. Ещё в 1883г. Д.И. Менделеев писал: “Должно думать, что все дело трения в трубах сведется к одному общему закону, в котором при больших скоростях оказывают влияние те члены, которые почти исчезают при малых, и обратно”.

При таком подходе студентам нужно иметь в виду только ОДНУ формулу, а не ПЯТЬ (две формулы для границ зон и три для вычисления λ). Кстати сказать, при условии, что первое слагаемое ($68/Re$) на порядок (в 10 раз) больше или меньше второго и округлении до одной значащей цифры и получаются числа 500 и 10, которые чаще всего используются для определения границ зон ($Re_B = 500d/\Delta \varepsilon$ и $Re_H = 10d/\Delta \varepsilon$).

Думается, что физические основы существования зон турбулентного режима можно (и нужно) спрашивать на экзамене, а при проведении гидромеханических расчетов на практике использовать наименьшее количество формул.

6. РАСХОД ЖИДКОСТИ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ РАСХОДА

В механике сплошной среды у жидкости нет структуры, и её можно представить себе в виде некоего студенистого амебообразного тела, которое как-то «протискивается» через узкие места в трубопроводе и «растекается» при увеличении сечения.

Результат

При таком представлении нет ничего удивительного, когда под словом «расход» студенты понимают «то, что расходуется по длине трубы (прилипает к стенкам)». Совершенно непонятно также, почему этот расход остается постоянным при изменении сечения трубопровода.

Что делать?

Представлять себе некоторый объём жидкости массой m состоящим из молекул, между которыми есть связи, и который может перемещаться как одно целое в направлении действия касательной силы. Тогда, если мысленно поместить наблюдателя в какую либо точку сечения трубы, и «считать» все молекулы, которые пролетают через сечение за единицу времени, и потом определить их суммарную массу, то это и есть массовый расход.

Если пренебречь расстоянием между молекулами, то можно считать, что все «пролетевшие» за единицу времени молекулы попали в объём $Q = v \cdot S$.

Понятно также, почему расход пропорционален скорости и площади сечения, ведь при их увеличении через сечение трубы «пролетает» больше частичек.

Если принять, что стенки трубы не пропускают молекулы, то их количество, проходящее через любое сечение за одно и то же время, останется неизменным (при стационарном режиме). Что-

бы «усилить» этот момент, я привожу пример с яблоком¹¹, которое перемещается вместе с жидкостью (этот пример приводится в тексте учебного пособия).

7. ПРИНЦИП РЕДУКЦИОНИЗМА. БРИТВА ОККАМА И ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ

Под все вышесказанное можно подвести философскую основу в виде принципа редукционизма¹², аналогом которого является выражение «бритва Оккама». В XIV веке Уильям Оккам был одним из самых известных философов своего времени, но сегодня мы знаем его лишь как автора принципа простоты, который он сформулировал в одной из своих книг, предложив «сбригать» лишнюю сложность в аргументации. Он верил в Аристотелев постулат: не нужно искать сложностей, кроме тех случаев, когда это абсолютно необходимо, и считал, что научное познание основывается на опыте и самоочевидных доказательствах.

Принцип «бритва Оккама» применительно к проблеме преподавания в современном мире можно трактовать и следующим образом: среди различных способов достижения целей обучения в каждом конкретном случае выбирать наиболее простые. А таких случаев просматривается как минимум два, в связи с официальным введением с 2007 года в Высшей школе России двухуровневой системы подготовки бакалавр-магистр.

Согласно существующим взглядам бакалавр – исполнитель в решении профессиональных задач, а магистр в профессии (специалист) - ставит профессиональные задачи, предлагает пути их решения и участвует в их реализации. Все более актуальной становится проблема структуризации знаний по ступеням образования и создания образовательных технологий на каждом уровне, адекватных заявленным целям. В этой связи предлагаемая методика изложения гидромеханики на 100% годится для бакалавров, так как она позволяет объяснять и анализировать уже существующие гидромеханические процессы и решать типовые производственные задачи.

В то же время несомненным достоинством инструментария механики сплошной среды является возможность получения нового знания, что является одной из основных целей при обучении магистров (специалистов). Курсы теоретической гидромеханики, механики сплошной среды, реологии¹³ и др. можно (и необходимо) изучать в технических университетах, но на основе базовой программы для бакалавров и не всем студентам, а только магистрам (или в виде курсов по выбору).

К сказанному хочется добавить следующее. Для того чтобы в результате обучения у студента сформировалась некая система фундаментальных знаний, необходимо всячески подчеркивать связи между гидромеханикой и другими дисциплинами естественнонаучного цикла, а не искусственно разделять их, вводя новые понятия (пьезометрическая плоскость, тело давления, гидравлический уклон, очень много «напоров» и т. д.). Например, с помощью аппарата исследования функций и законов сохранения можно с единых позиций анализировать характер изменения давления в трубопроводах, при фильтрации жидкостей в призматическом, радиальном и

¹¹ Придуман молодой коллегой Светланой Нараевской в бытность моей работы в Ухтинском индустриальном институте (ныне технический университет).

¹² Редукционизм (от лат. *reductio*) — методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных явлениям более простым.

¹³ Реология – наука о течении реальных веществ. С её точки зрения нет принципиальной разницы между твердыми, жидкими и газообразными телами. Поведение вещества зависит от соотношения между временем релаксации (перестройки структуры) и временем процесса. Например, при взрыве газ ведет себя как твердое тело, и взрывная волна разрушает преграду таким же образом, как и брошенный камень.

сферическом пласте, прогнозировать вид графиков при численном решении уравнений (расчет трубопроводов) и т.д.

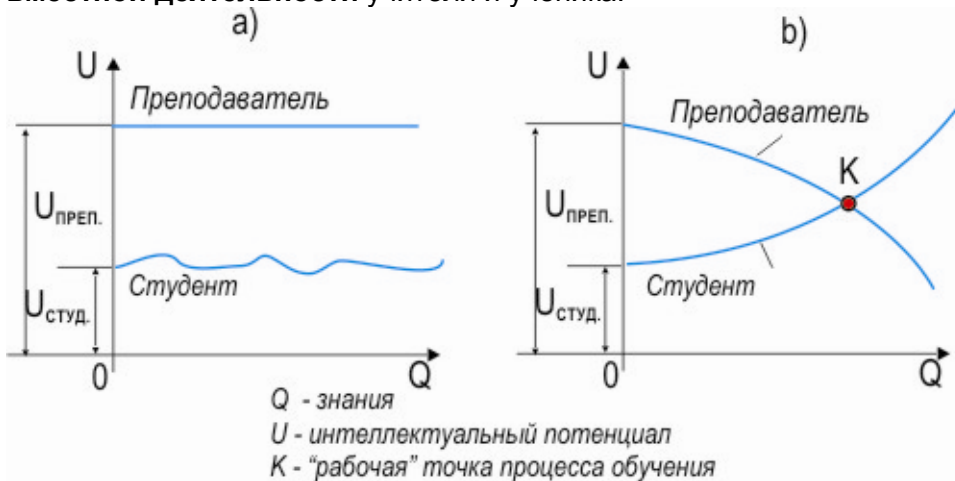
В этой связи очень уместно, на мой взгляд, сравнение эпюр давления на плоскую стенку и на балку. На стенку гидравлическая эпюра объёмная, а на балку плоская, все другие принципиальные связи между распределенной нагрузкой и сосредоточенной силой аналогичны.

8. ДЕЯТЕЛЬНОСТНЫЙ ПОДХОД

Уважаемые коллеги!

В основе педагогической концепции обучения лежат ответы на два вопроса: «**Чему учить?**» и «**Как учить?**» Выше я попылась высказать свои соображения о содержании учебного контента дисциплины «Гидромеханика», то есть ответить на вопрос «**Чему учить?**» применительно к некоторым разделам курса.

Вопрос «**Как учить?**» непосредственно касается технологии преподавания. В современном мире уже мало кто сомневается в том, что обучить чему-либо можно только в **процессе совместной деятельности** учителя и ученика.



Обучение фундаментальным дисциплинам можно представить в виде процесса передачи знаний от преподавателя к студенту, и формирования в результате этого у студента более высокого уровня интеллектуального потенциала.

На графике «а)» моделируется ситуация, когда профессор на очень

высоком научном уровне читает лекции, не обращая внимания на студента. Меня не перестает удивлять добросовестное заблуждение некоторых преподавателей, что их знания и опыт, полученные в результате многолетней научной деятельности, общения с коллегами, работы с литературой могут быть переданы студенту в «мгновение ока», после публичного выражения оных в виде лекции. И более того, преподаватель ожидает, что ЕГО знания студент воспроизведет без изменения на экзамене, через какое-то время...

Вы скажете, есть ещё практические и лабораторные занятия для закрепления знаний и получения неких навыков. Однако при бригадном способе проведения лабораторных работ и пассивном участии студентов в решении задачи их товарищем на доске во время практического занятия, и отсутствии организованной самостоятельной работы эти навыки сводятся к минимуму. К сожалению, «рабочая точка» такого «процесса» обучения отсутствует, потому как нет совместного процесса. Каждый сам по себе....

Что делать?

➤ Можно предложить преподавателю «спуститься на землю» и понять, что студент в принципе не в состоянии достичь его уровня интеллектуального потенциала за учебный семестр, при «конвейерном» способе обучения, когда параллельно преподаются несколько серьезных учебных предметов и, главное, не продумана и не стимулируется самостоятельная работа студента под руководством преподавателя.

- Желательно на лекциях при изложении материала использовать механические аналогии и модели, и, как советовал Д.К. Максвелл, «сопровождать каждый свой шаг ясным физическим изображением явления». Некоторые примеры того, как это сделать при преподавании гидромеханики приводятся в данном учебном пособии. Я уверена, уважаемые коллеги, что при желании Вы сами можете придумать новые, гораздо более эффективные примеры! При этом научный (читай – математический) уровень передаваемого преподавателем интеллектуального потенциала несколько снижается (рис. «b»)). Методические пособия и разработки уменьшают скорость этого снижения.
- Для того чтобы кривая обучения студента шла вверх, он должен быть мотивирован и включен в учебные ситуации, приближенные к его будущей практической деятельности. Хорошо работают домашние расчетные задания, коллоквиумы, индивидуальные задания на практических занятиях, самостоятельное выполнение лабораторных работ и другие формы деятельности. Обязательное условие – самостоятельная работа студента в течение семестра под руководством преподавателя.
- Итоговый контроль. Деятельностное обучение направлено на формирование у студента системы знаний по предмету. Выявить наличие или отсутствие у него такой системы возможно при ответе на качественные задания (в том числе и тестовые), а также при решении на экзамене разного рода задач. На мой взгляд, недопустимо принимать экзамен по теоретическим вопросам, ответы на которые можно найти в учебнике.

9. ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИКЕ «ИНФОРМГИДРО»

В современной российской Высшей школе реализация на практике деятельностного подхода в обучении упирается в очень серьезные трудности, которые хорошо известны. Прежде всего – это массовость обучения, большое количество студентов на одного преподавателя, что не позволяет ему уделять достаточно времени каждому студенту.

Но даже не это главное. Процесс обучения привязан к конкретному месту, времени и преподавателю. Известно, что преподавание – скорее искусство, чем наука, и молодые преподаватели (а иногда и не очень молодые) не могут обучить студентов необходимым умениям и навыкам (как теперь стало модным говорить – компетенциям). Для этого им не хватает знаний и опыта, а иногда и желания.

Кроме этого, студент имеет право на постижение «гранита» науки гидромеханики в любое удобное для него время, и желательно в уютной домашней обстановке....

Все это подвигло меня на создание информационной технологии обучения «ИнформГидро¹⁴», которая является, по существу виртуальным преподавателем по технической гидромеханике. Технология представляет собой программное обеспечение, подготовленное в среде визуального программирования **Visual Basic 6**. Технология разработана в двух вариантах:

1. Устанавливается в локальной сети учебного заведения. Результаты работы студентов направляются в базу данных. Разработаны задания для рубежного и итогового контроля.
2. Распространяется на диске, как приложение к данному учебному пособию. Подробное содержание диска представлено в **Приложениях** к книге. Имеется два раздела: обучающие программы и лабораторные работы. Базы данных нет, программное обеспечение в виде исполняемых файлов предназначено для самостоятельной работы.

¹⁴ Основное содержание этой технологии можно посмотреть по адресам: http://ifets.ieee.org/russian/depository/v8_i2/html/8.html
http://www.gubkin.ru/personal_sites/raykinal/ .

- **При разработке компьютерной технологии** обучения «ИнформГидро» за основу принят деятельностный подход. Это выражается в том, что студент изучает теоретический материал в справочном файле не просто так, не ради любопытства, а чтобы решить некую проблему: ответить на вопрос входного контроля для выполнения лабораторной работы, решить задачу, выполнить задание в обучающей программе и т.д. Причем проверка правильности ответа виртуальным преподавателем является немедленной. Программа позволяет студенту работать со справочным файлом как угодно долго, «разрешает» ему делать несколько попыток, возвращаться к решению проблемы в другое время и сколько угодно раз...
- **Справочные файлы** (на диске их 14) имеют, в основном, гипертекстовую структуру. При желании студент может познакомиться с некой проблемой достаточно глубоко с помощью перекрестных ссылок и нелинейного маршрута по справочному файлу. Психологи утверждают, что подобная нелинейность в обучении способствует лучшему проникновению в проблему.
- **Обучающие программы** (8 наименований) призваны помочь студенту усвоить основные теоретические понятия, законы, связи и соотношения дисциплины. Особые надежды автор возлагает на обучающие программы по решению задач. Исходные данные задачи выбираются из определенного диапазона с использованием генератора случайных чисел. Студент должен получить численный результат с заданной точностью. В справочных файлах приводится методика решения задач.
- **Компьютерные лабораторные работы** (6 наименований). Лабораторная работа представляет собой ряд пользовательских интерфейсов. На одном из них проводится компьютерный эксперимент – "открывается" кран, включается секундомер, "измеряется" объем жидкости, давление и другие параметры. Процесс движения жидкости сопровождается звуком, используются анимационные эффекты. При выборе варианта исходных данных используется генератор случайных чисел.

Результаты опытов заносятся в таблицу опытных данных и далее направляются в **MS Excel**, где производится их обработка. Студент самостоятельно вводит в электронную таблицу расчетные формулы, строит и форматирует графики. Имеется «мощная» методическая поддержка в виде готового отчета по лабораторной работе (с другими данными). При затруднениях студент может посмотреть, как выглядят введенные формулы, как можно построить и отформатировать графики.

Таким образом, используя способ **«Делай по образцу»**, студент обучается на практике принципам и приемам работы с электронными таблицами, что, несомненно, ещё не раз понадобится ему в жизни (в частности, при выполнении курсовой работы по гидромеханике и другим дисциплинам).

- **Виртуальный преподаватель** «демонстрирует» снова и снова, как работают законы сохранения в технической гидромеханике, помогает студенту осмыслить полученные результаты, питая надежду, что, в конце концов, студент овладеет **Методом** анализа и решения прикладных задач, связанных с равновесием и движением жидкостей.

Метод (от греч. *mēthodos*) означает **путь**.

В добрый путь, уважаемые коллеги!

Надеюсь, Вы не пожалеете, что взяли в руки эту книгу, и она поможет Вам проанализировать и посмотреть со стороны на свой собственный педагогический опыт.

Желаю удачи!

Автор