

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А.А. Белогорлов И.В. Тронин

Лабораторная работа

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАПОЛНЕНИЯ
ПОРИСТЫХ СИСТЕМ»**

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений*

Москва 2008

УДК 539.2 (076.5) + 620.3 (076.5)

ББК 22.37я7

Б 43

Белогорлов А.А., Тронин И.В. Исследование динамики заполнения пористых систем: Лабораторная работа. М.: МИФИ, 2008. – 20 с.

Даны представления об экспериментальном методе исследования процессов заполнения и вытекания несмачивающей жидкости из нанопористых тел при ударном воздействии. Приведён анализ временных силовых и энергетических характеристик процесса заполнения – вытекания несмачивающей жидкости из гидрофобного нанопористого тела при ударном воздействии. Описана экспериментальная установка, методика получения и анализа зависимостей заполнения и вытекания несмачивающих жидкостей при ударном воздействии.

Лабораторная работа предназначена для студентов, обучающихся по специальности «Физика кинетических явлений».

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы МИФИ.

Рецензент канд. физ.-мат. наук А.В. Зенкевич

ISBN 978-5-7262-0992-0

© Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2008

Цель: исследование процессов заполнения и вытекания несмачивающей жидкости из нанопористых тел при ударном воздействии, анализ силовых, временных и энергетических характеристик процесса заполнения – вытекания при ударном воздействии по полученным временным зависимостям давления и объёма в процессе заполнения – вытекания несмачивающей жидкости из гидрофобного нанопористого тела.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика процесса заполнения – вытекания несмачивающей жидкости из пористого вещества, несмотря на перспективность создания устройств демпфирования и аккумуляции энергии ударного воздействия устройствами, где в качестве рабочего элемента может быть использована такого типа система, мало изучена как с точки зрения экспериментальной физики, так и в части фундаментальных исследований.

К настоящему моменту известно, что процессы заполнения – вытекания несмачивающей жидкости из пористого тела существенно различаются на различных характерных масштабах скорости изменения давления.

При медленном (квазистатическом) заполнении в зависимости объёма жидкости в пористом теле от давления $V(p)$ в цикле заполнения – вытекания наблюдаются гистерезис и явление невытекания [1,2] жидкости из пористого тела при сбросе избыточного давления до атмосферного. Эти явления могут быть описаны в рамках теории перколяции [3], если учесть энергетический барьер флуктуационного заполнения-вытекания жидкости из поры. При этом условие обращения в нуль энергетического барьера для пористых тел с распределением пор по размерам позволяет установить давление, которое определяет доступность для заполнения поры данного радиуса в системе сообщающихся пор. Это условие обобщает для пористых тел соотношение Лапласа. При повышении давления повышается число доступных пор, и поры, окружающие данную, также могут стать доступными для заполнения. Таким образом, в пористом теле образуется кластер доступных пор, который заполняется жидкостью. При этом заполнение пористого тела носит пороговый характер и начинается при некотором характерном

давлении (давлении заполнения), зависящем от свойств пористого тела и несмачивающей жидкости. Процесс вытекания физически аналогичен процессу заполнения, происходит путем образования кластеров доступных для вытекания пор по мере уменьшения давления и начинается при давлении вытекания, меньшем давления заполнения, чем и обусловлено наличием гистерезиса в кривой заполнения - вытекания.

При быстром (динамическом) сжатии со скоростью роста давления $\dot{p} = 10^4 \div 10^5$ атм/с для некоторых систем несмачивающая жидкость – пористое тело было обнаружено, что заполнение происходит за порогом перколяции при давлении, значительно превышающем давление заполнения. Так, для системы СХ 1.5 – сплав Вуда величина порогового давления в 1.6 раза превышает давление заполнения, а для системы Fluka 100 – вода в 2 раза [4,5]. При этом пороговое давление не зависит от энергии ударной нагрузки, а площадь петли гистерезиса заполнения-вытекания, а значит поглощаемая за цикл заполнения – вытекания энергия, больше чем энергия, поглощаемая за цикл в случае квазистатического сжатия. Существенно при этом, что поглощаемая за цикл энергия не зависит от вязкости жидкости. При динамическом заполнении наблюдаются также нерегулярные осцилляции давления [5]. Из этого следует, что при уменьшении характерного времени сжатия системы изменяется физический механизм заполнения пористого тела. Однако на сегодня механизм заполнения пористого тела при быстром сжатии остается до конца невыясненным. Таким образом, исследование закономерностей заполнения нанопористого тела несмачивающей жидкостью при быстром сжатии представляет фундаментальный интерес для понимания динамики перколяционного перехода, и практический интерес в целях разработки нанотехнологий поглощения ударных воздействий и устройств демпфирования и аккумулялирования механической энергии на их основе.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Выполнение лабораторной работы проводится на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 1. На массивной горизонтальной плите 1, закреплены четыре вертикальные,

стальные трубы 2, которые сверху жестко связаны стальной пластиной 3. Между пластиной 3 и плитой 1 натянута стальные тросы 4, натяжение которых регулируется. Груз 5 массой $m_g = 10.3$ кг обеспечивает ударное воздействие на шток и свободно движется вдоль тросов. На плите 1 установлен тензометрический датчик силы 6, на который устанавливалась камера высокого давления 7 (более детально схема камеры со штоком представлена на рис. 2) заполненная пористым телом и несмачивающей жидкостью. Датчик позволяет измерять величину силы F от 10 до 10^4 Н с погрешностью измерения $< 5\%$ при значении силы > 100 Н. Шток камеры 8 с помощью стальной пластины 9 жестко связан со штоком реохордного датчика перемещений 10. Датчик 10 позволяет регистрировать перемещение штока 8 при ударе до 14.0 см и при площади штока $S = 7.85 \cdot 10^{-1}$ см² (диаметр штока $D = 1$ см) изменение объема системы $-\Delta V$ до 11 см³ с погрешностью $< 5\%$. При этом датчик 6 регистрирует силу F , с которой груз действует на шток и, следовательно, давление в камере $p=F/S$. Частотный диапазон измерений датчиков силы и перемещения с постоянной чувствительностью ограничен частотой 5 кГц.

При ударе груза 5 шток 8 входит в камеру 7, что приводит к уменьшению объема системы и увеличению давления в камере 7. Начало записи показания датчиков силы и перемещения происходит при превышении программно задаваемого порогового значения сигнала с датчика 6 (в экспериментах данная величина составляет 50 Н). Это исключает возможность преждевременного начала записи данных с датчиков из-за вибраций установки при движении груза вниз. После запуска показания датчиков силы и перемещения через усилитель подаются на АЦП компьютера и записываются в массив, содержащий до 11000 измерений. При этом фиксируется время начала и окончания измерений по внутреннему таймеру компьютера. После заполнения массива определяется среднее время между записанными сигналами датчиков и время съема данных. Каждому значению сигнала присваивается соответствующее время. Погрешность в определении времени поступления сигнала составляет менее 3%. Полученные данные обрабатываются, и строятся графики зависимости силы, и изменения объема от времени. Скорость увеличения давления составляет $\dot{p} = (1 \div 8) \cdot 10^4$ атм/с. Энер-

гия ударного воздействия определяется, как $E = m_g \cdot g \cdot h$, где m_g – масса груза, h – расстояние между штоком камеры и грузом, g – ускорение свободного падения. Возможность использования такого метода оценки энергии удара была проверена на модельных экспериментах, в которых была использована камера без пористого тела, заполненная лишь жидкостью с известной сжимаемостью (вода). Результаты модельных экспериментов показывают, что в случае упругого взаимодействия падающего груза и камеры энергия упругой деформации камеры и жидкости в пределах погрешности измерений совпадает с оценочной формулой. Так, при падении груза с высоты 20 см, что соответствует энергии 20 Дж, полученное значение энергии упругой деформации составило 21 ± 2 Дж.

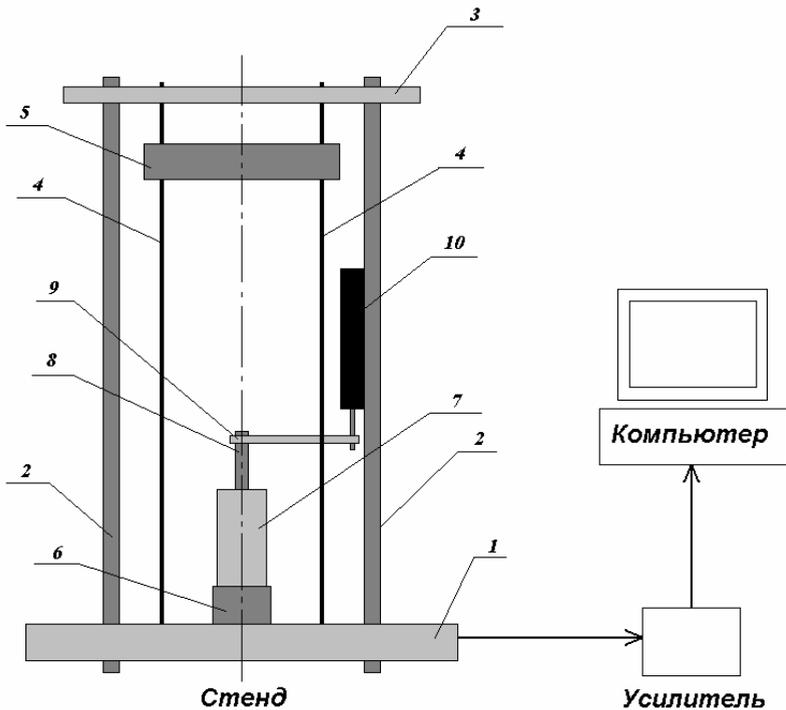


Рис. 1. Схема стенда для исследования динамики заполнения – вытекания несмачивающей жидкости из пористого тела

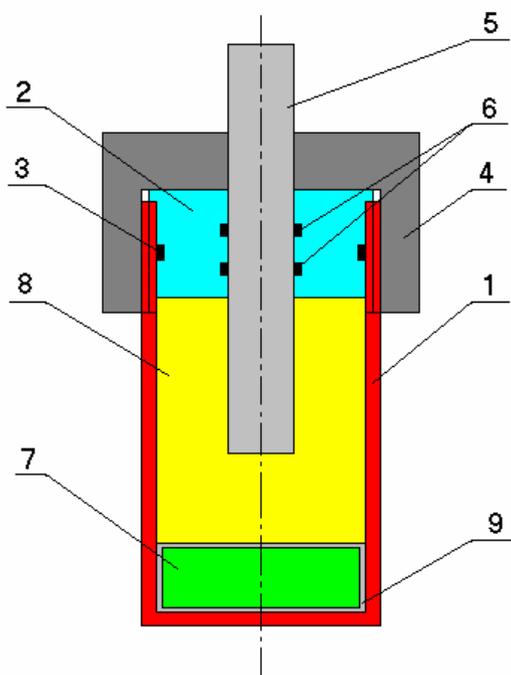


Рис. 2. Камера высокого давления

Конструкция камеры позволяет проводить измерения при увеличении внутреннего давления до 1000 атмосфер. Камера представлена в сборе и состоит из корпуса 1, пробки 2, резинового кольцевого уплотнения 3, крышки 4, штока 5, уплотнений 6, также внутри показано пористое тело 7 в проницаемом для жидкости 8 контейнере 9. Корпус 1, пробка 2 и крышка 4 изготовлены из титанового сплава. Максимально возможный объём пористого тела составляет $\sim 20 \text{ см}^3$. Свободный объём камеры, закрытой пробкой 2, без пористого тела 7 составляет 60 см^3 .

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой для исследования динамики заполнения пористых веществ несмачивающей

2. Получить экспериментальные зависимости изменения давления и объёма в камере от времени для нескольких энергий ударного воздействия при одной температуре.

3. Получить экспериментальные зависимости изменения давления и объёма в камере от времени для трёх температур при одной энергии ударного воздействия.

4. На основе полученных экспериментальных данных определить силовые и временные характеристики процесса, удельную энергию заполнения, удельную энергию вытекания, удельную диссипированную энергию для каждой энергии ударного воздействия и построить зависимости данных величин от энергии ударного воздействия и от температуры эксперимента.

5. Сравнить полученные данные с результатами в квазистатике.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить компьютер и усилитель.

2. На весах отмерить навеску в 3 г для исследуемого образца пористого вещества.

3. Поместить пористое вещество 7 в проницаемый для несмачивающей жидкости контейнер 9 и закрыть его.

4. Поместить контейнер 9 с пористым веществом на дно корпуса 1 камеры высокого давления.

5. Заполнить камеру несмачивающей жидкостью 8. **Внимание: в случае работы с агрессивными жидкостями необходимо использовать резиновые перчатки и защитные очки!**

6. Вставить в корпус 1 пробку 2 и зафиксировать её крышкой 4 (см. рис. 2).

7. По необходимости с помощью шприца добавить или уменьшить количество несмачивающей жидкости до нижнего уровня пробки 2.

8. В отверстие пробки 2 вставить шток и с усилием на него надавить.

9. Вынуть шток и в случае необходимости долить несмачивающую жидкость до нижнего уровня пробки 2 (п. 8 и 9 выполня-

ются для удаления воздуха из межгранульного пространства пористого вещества).

10. Повторять п. 8 и 9 до момента фиксации уровня жидкости в камере.

11. До упора вставить шток в камеру.

12. Получить у преподавателя значения для абсолютной сжимаемости системы камера + несмачивающая жидкость + незаполненное пористое тело χ_{sys} , значение давления начала заполнения пористого вещества данной несмачивающей жидкостью в квазистатике p_{in} и значение удельной энергии заполнения пористого вещества данной несмачивающей жидкостью в квазистатике E_{in} .

13. Рассчитать по формуле (1) энергию груза, необходимую для заполнения пористого вещества данной массы m :

$$E_g = \chi_{sys} \cdot p_{in}^2 + m \cdot E_{in}. \quad (1)$$

14. Рассчитать высоту груза над штоком для получения необходимой энергии удара как:

$$h_g = \frac{E_g}{m_g \cdot g}. \quad (2)$$

15. Накрутить на шток планку и зафиксировать её гайкой.

16. Готовую к эксперименту камеру установить на датчик силы.

17. В паз планки вставить шток датчика перемещения и зафиксировать его гайкой.

18. Измерить расстояние между свободным концом штока и плитой основания h_0 и записать его.

19. Запустить программу «dyntest.exe»

20. После инициализации и определения начальных значений датчиков силы и перемещения программа готова к работе. На экране будут изображены координатные оси, где вертикальная ось – ось давлений P (катм), горизонтальная ось – ось времени T (мс).

21. Снять груз с фиксирующих петель и выставить его по уровню на высоту соответствующую $h_0 + h_g$.

22. Сбросить груз на шток камеры.

23. После удара груз поднять и закрепить с помощью фиксирующих петель.

24. На экране монитора после удара появится зависимость давления в камере от времени, а после нажатия клавиши «Пробел» зависимость изменения объёма от времени. Повторное нажатие клавиши «Пробел» приведёт к появлению вопроса о сохранении результатов, на который ответить нажатием клавиши «Y». Далее на запрос ввести имя файла в виде «№ семестра № группы № по списку № эксперимента» (по два знака на номер) например «06030101». Записать название файла. Нажать «Enter». На вопрос о добавлении комментариев нажать клавишу «Y». В качестве комментариев указать номер образца пористого вещества, массу пористого вещества, несмачивающую жидкость, температуру системы пористое вещество – несмачивающая жидкость в эксперименте высоту падения груза. После окончания ввода комментариев нажать «Enter» и программа автоматически завершится.

25. Проверить крепление планки на штоке камеры и штока датчика перемещения.

26. Повторно измерить расстояние между свободным концом штока и плитой основания h_0 и записать его.

27. Запустить программу «dylntest.exe» и выполнить п. 21 – 26.

28. Выполнить п. 19 – 26 для высот от 0.1 м до h_g .

29. После выполнения п.28 открутить гайку, фиксирующую шток датчика перемещения, и вынуть его из паза планки.

30. Открутить гайку, фиксирующую планку на штоке камеры.

31. Убрать камеру со стенда и поставить её на лабораторный стол.

32. Скрутить планку со штока камеры.

33. Разобрать камеру и утилизировать её содержимое (пористое вещество и несмачивающую жидкость) в следующей последовательности. Вытащить шток, открутить и снять крышку, вставить шток в отверстие пробки и надавить на него до максимального вхождения в камеру, при этом пробка частично выйдет из корпуса камеры за счёт увеличения внутреннего давления. Попробовать вытащить пробку вместе со штоком. Если пробка не вытаскивается, вытащить шток, придерживая пробку, и повторно вставить в отверстие пробки шток до упора (в некоторых случаях может потребоваться добавление жидкости в камеру). Вытащить пробку со штоком. Удалить пористое вещество и несмачивающую жидкость

34. Провести измерения для температуры ниже и выше комнатной для одной из высот падения груза в соответствии с указанием преподавателя, ведущего лабораторные занятия п.35 - 33.

35. Для каждой из температур повторить п. 2 – 10.

36. Поместить камеру и ёмкость с несмачивающей жидкостью в термостат или заменяющее его устройство.

37. Осуществить прогрев или охлаждение камеры и ёмкости с несмачивающей жидкостью до заданной температуры.

38. По необходимости вследствие изменения объёмов компонентов системы при изменении температуры добавить или удалить излишки жидкости с помощью шприца.

39. Проложить на датчик силы термоизолирующую прокладку.

40. До упора вставить шток в камеру.

41. Установить на корпус и крышку камеры теплоизолирующий кожух.

42. Повторить п. 15 – 24. В п. 21 высота падения груза относительно свободного конца штока определена в п. 34.

43. Открутить гайку, фиксирующую шток датчика перемещения, и вынуть его из паза планки, далее выполнить п. 30 – 32.

44. Снять теплоизолирующий кожух. Вытащить шток и измерить температуру в камере после эксперимента. Далее продолжить выполнение п. 33.

45. Записать на личный носитель информации (дискету или флеш-накопитель) результаты экспериментов и в дальнейшем их обработать.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определить для каждого эксперимента силовые и временные характеристики процесса заполнения – вытекания несмачивающей жидкости при ударном воздействии и заполнить табл. 1.

1.1. Запустить программу обработки данных «dinobrt.exe»

1.2. Ввести название файла. Нажать «Enter».

1.3. Ввести абсолютную сжимаемость системы камера + жидкость χ_1 . Данные по абсолютной сжимаемости системы камера + жидкость получить у преподавателя. Нажать «Enter».

Таблица 1.

h , см	t_1 , мс	t_2 , мс	t_3 , мс	t_{in} , мс	t_{out} , мс	\bar{p} , атм	V_{in_3} см ³

1.4. Ввести абсолютную сжимаемость пористого вещества χ_2 . Абсолютная сжимаемость пористого вещества рассчитывается по формуле:

$$\chi_2 = \chi_{rel} \cdot V_{pb} \cdot m, \quad (3)$$

где χ_{rel} – относительная сжимаемость пористого вещества, V_{pb} – удельный объём пористого вещества. Значения χ_{rel} и V_{pb} получить у преподавателя. Нажать «Enter».

1.5. Ввести давление начала заполнения пористого тела несмачивающей жидкостью. Нажать «Enter».

1.6. Далее программой автоматически производится расчёт времени начала заполнения t_1 , времени начала вытекания t_2 , времени окончания вытекания t_3 , времени заполнения t_{in} , времени вытекания t_{out} , заполненного объёма V_{in} и характерного давления заполнения \bar{p} . На рис. 3 представлена схема расчёта временных и силовых характеристик процесса заполнения – вытекания в условиях ударной нагрузки.

Из квазистатических измерений, известно, что ниже давления p_1 , соответствующего давлению начала заполнения пор, наблюдается только упругая деформация системы камера, жидкость и незаполненное пористое тело. Следовательно, и при ударном воздействии заполнение пор возможно лишь при давлениях $p > p_1$. Исходя из полученных в квазистатических измерениях данных по сжимаемости камеры, заполненной жидкостью χ_1 и сжимаемости незаполненного пористого тела χ_2 , определяется значение времени начала изменения объема системы t_0 линейной аппроксимацией зависимости $p(t)$ и начальный объем V_0 .

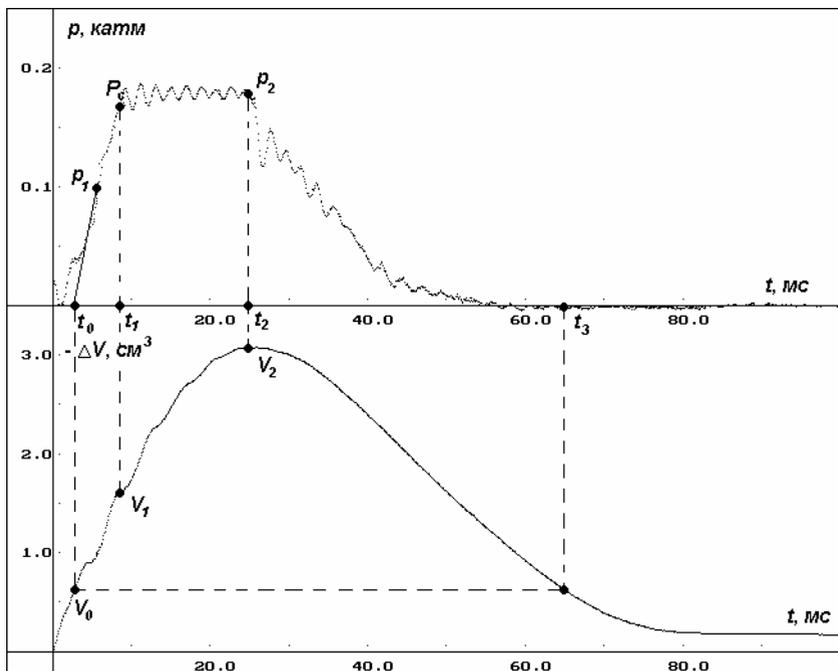


Рис. 3. Схема расчета временных и силовых характеристик процес-са заполнения – вытекания в условиях ударной нагрузки

Дальнейший анализ изменения объема системы показывает, что до момента времени t_1 уменьшение объема системы составляет в пределах погрешности измерений равно уменьшению объема обусловленного сжимаемостью камеры, жидкости и незаполненного пористого тела. Таким образом, на интервале времени $t_0 - t_1$ в пределах погрешности измерений наблюдается только упругая деформация. Полученное время начала заполнения соответствует времени начала участка зависимости $p(t)$, на котором давление в пределах погрешности эксперимента меняется слабо. Время остановки движения штока при входе и начало выхода штока t_2 определяется точкой максимума зависимости объема от времени V_2 . На интервале времени $t_1 - t_2$ наблюдаемое изменение объема (см. рис. 3)

связано не со сжимаемостью камеры и системы, а с заполнением пор пористого тела. На временах $t > t_2$ увеличение объема системы и камеры связано со снятием упругих напряжений и вытеканием жидкости из пор пористого тела. Время вытекания жидкости t_3 определяется по равенству $V_0 = V(t_3)$, что соответствует снятию упругих деформаций и вытеканию жидкости из пор. Время заполнения пор пористого вещества определяется как $\overline{t}_{in} = t_2 - t_1$, время вытекания $t_{out} = t_3 - t_2$, характерное давление \overline{p} среднее при заполнении

пористого тела интервале $t_1 - t_2$ как $\overline{p} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt$, объем

жидкости, вошедшей в поры пористого тела, $V_{in} = V_2 - V_1$.

2. Определить для каждого эксперимента энергетические характеристики процесса заполнения – вытекания несмачивающей жидкости при ударном воздействии и заполнить табл. 2.

Таблица 2

h , см	E , Дж	E_o , Дж	E_{el} , Дж	E_{in} , Дж	E_{out} , Дж	E_{dis} , Дж

2.1. Запустить программу обработки данных «dinobre.exe»

2.2. Ввести название файла. Нажать «Enter».

2.3. Ввести абсолютную сжимаемость системы камера + жидкость χ_1 (см. п. 1.3). Нажать «Enter».

2.4. Ввести абсолютную сжимаемость пористого вещества χ_2 (см. п. 1.4). Нажать «Enter».

2.5. Ввести время начала заполнения t_1 (см. табл. 1). Нажать «Enter».

2.6. Ввести время окончания заполнения t_2 (см. табл. 1). Нажать «Enter».

2.7. Ввести время окончания вытекания t_3 (см. табл. 1). Нажать «Enter».

2.8. Далее программой автоматически производится расчёт поглощённой энергии E , возвращённой энергии E_0 , энергии упругой деформации E_{el} , энергии заполнения E_{in} , энергии вытекания E_{out} и диссипированной энергии E_{dis} .

Расчет энергетических параметров основывается на численном интегрировании экспериментальной зависимости $p(t)$ (см. рис. 3) и расчёте энергии упругой деформации системы. Энергия падающего груза поглощённая системой рассчитывается как сумма энергии переданной грузом системе при заполнении и энергии упругой деформации системы до начала заполнения как:

$$E = \frac{W_1^2}{2 \cdot m_g} + \frac{(\chi_1 + \chi_2)}{2} \cdot p(t_1)^2, \quad (4)$$

где W_1 – поглощённый импульс, определяемый на временном интервале $(t_1 - t_2)$:

$$W_1 = S \cdot \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt, \quad (5)$$

S – площадь штока, m_g – масса груза.

Данный расчет энергии упругой деформации обуславливается тем, что при давлениях, меньших давления p_1 , жидкость не заполняет поры и происходит только упругая деформация пористого тела, жидкости и камеры. Полная энергия упругой деформации определена как:

$$E_{el} = \frac{\chi_2}{2} \cdot p(t_1)^2 + \frac{\chi_1}{2} \cdot p(t_2)^2. \quad (6)$$

Расчет энергии удара, затраченной на упругую деформацию системы, по формуле (6) позволяет проанализировать также экспериментальные зависимости в случае упругой деформации системы с частично заполненным пористым телом.

После остановки груза t_2 , под действием давления в камере, шток начинает выходить и разгонять груз. Полный импульс и энергия, переданные грузу при выходе штока из камеры определяются как

$$W_2 = S \cdot \int_{t_2}^{t_3} p(t) \cdot dt \text{ и } E_o = \frac{W_2^2}{2 \cdot m_g}. \quad (7)$$

Так как упругие деформации обратимы, то энергия, затраченная на заполнения пор пористого тела, равна

$$E_{in} = E - E_{el} \quad (8)$$

и энергия вытекания жидкости из пор

$$E_{out} = E_o - E_{el} \quad (9)$$

Диссипированная энергия в цикле заполнения – вытекания жидкости равна разности:

$$E_{dis} = E - E_o \quad (10)$$

3. Рассчитать и записать в табл. 3 значения удельных энергий заполнения, вытекания, диссипированной энергии, а также удельный заполненный объём.

Таблица 3

$h, \text{ см}$	$E_{in}, \text{ Дж/г}$	$E_{out}, \text{ Дж/г}$	$E_{dis}, \text{ Дж/г}$	$V_{in}, \text{ см}^3/\text{г}$

4. Построить зависимости удельной энергии заполнения, удельной энергии вытекания, удельной диссипированной энергии, удельного заполненного объёма, характерного давления заполнения и времени заполнения от энергии ударного воздействия и от температуры эксперимента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение элементов установки?
2. Что такое гистерезис заполнения-вытекания и явление невытекания?
3. Что такое квазистатическое и динамическое заполнение?
4. Что такое давление заполнения и давление вытекания?
5. В чем физическое отличие процессов заполнения и вытекания при квазистатическом и динамическом заполнении?

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА УСТАНОВКЕ

1. К работе допускается только персонал, прошедший инструктаж по работе с электроустановками.
2. Соблюдайте правила безопасности, касающиеся анализируемых проб и используемых жидкостей.
3. Запрещается самостоятельно производить какие-либо изменения в конструкции прибора и его электронной схеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борман В.Д., Грехов А.М., Троян В.И.// ЖЭТФ, 2000. т. **118**. с. 193.
2. Борман В.Д., Белогорлов А.А., Грехов А.М., Тронин В.Н., Троян В.И., Лисичкин Г.В.// ЖЭТФ, 2005. т. **127**. с. 2.
3. Федер Е. Фракталы. — М.: Мир, 1991.
4. Falgun B. Surani, Xinguo Kong, Deepam B. Panchal et all// Apl. Ph. Let., 2005. v. **87**. p. 163111.
5. Борман В.Д., Белогорлов А.А., Грехов А.М., Лисичкин Г.В., Тронин В.Н., Троян В.И.// Письма ЖЭТФ, 2001. т. **74**. с.5.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Описание лабораторной установки	4
Рабочее задание	7
Порядок выполнения работ	8
Обработка результатов	11
Контрольные вопросы	16
Список литературы	17

Антон Анатольевич Белогорлов
Иван Владимирович Тронин

Лабораторная работа

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАПОЛНЕНИЯ
ПОРИСТЫХ СИСТЕМ»**

Редактор Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 12.11.08. Формат 60x84 1/16
Печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 120 экз.
Изд. № 3/63 Заказ №

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)
115409, Москва, Каширское ш. 31.

Типография издательства «Тровант»
г. Троицк

