

Föderale Bildungsvertretung

Staatliche Universität Tomsk  
für Architektur und Bauwesen

*Das von der Erfahrung  
nicht geprüfte Wissen ist  
unfruchtbar.*

*Leonardo da Vinci*

**PRAKTIKUM  
HYDRAULIK MIT DEM TRAGBAREN  
LABORATORIUM «KAPELKA»**

Methodische Hinweise zu den Laborarbeiten  
Unveränderter Nachdruck 2

Verfasser G.D. Slabozhanin, D.G. Slabozhanin



Tomsk – 2006

Praktikum Hydraulik mit dem tragbaren Laboratorium "Kapelka". Methodische Hinweise zu den Laborarbeiten / G.D. Slabozhanin, D.G. Slabozhanin. – Tomsk: Verlag von der Universität Tomsk für Architektur und Bauwesen, 2006.- 30 Seiten.

Rezensent Doktor der physikalisch-mathematischen Wissenschaften  
A.W. Zhukow

Redakteur T.S. Wolodina

**Das Praktikum wurde vom Präsidium des wissenschaftlichen methodischen Rates der HYDRAULIK des STAATLICHEN BILDUNGSKOMITEES DER UdSSR am 17. Januar 1991 zur Veröffentlichung empfohlen.**

In den Hinweisen werden theoretische Grundlagen, Inhalt und Ausführungsfolge von Demonstrationen und Laborarbeiten in der Hydraulik (Flüssigkeitsmechanik) im von den Verfassern entwickelten tragbaren Laboratorium „Kapelka“ angeführt. Es hat im Allunionswettbewerb für Lehrtechnik im Jahre 1990 die erste Stelle belegt und wurde von der Staatsbildung zur Produktion empfohlen. Heute benutzen schon mehr als 500 Lehranstalten dieses Laboratorium. Sie haben das Weltniveau der technischen Neuheit (Erfindungspatente 1721326, 1742655, 1728725) und seine Vorteile im Vergleich zu den herkömmlichen Analoga anerkannt: es hat keine Motoren, Pumpen, Ventile, erfordert keine Zufuhr von Wasser und elektrischer Energie, passt in einen Diplomatenkoffer, ist für die Lektionsdemonstrationen bequem; spart etwa 20 m<sup>2</sup> Laborflächen ein und ist kostengünstig. Die methodischen Hinweise sind für Studenten der Bau-, technologischen und mechanischen Spezialitäten bestimmt.

Die Hinweise werden nach dem Beschluss des methodischen Seminars des Lehrstuhls für Wärme-Gas-Versorgung № 2 vom 25.10.2005 gedruckt.

Die Hinweise sind vom Prorektor für Lehrarbeit O.G. Kumpjak genehmigt und eingesetzt.

Vom 01.01.2006

Bis zum 01.01.2009

## INHALT

1.	Laborarbeit 1. Das Studium der physikalischen Eigenschaften von Flüssigkeiten.	4
2.	Laborarbeit 2. Das Studium der Druckmessgeräte.	10
3.	Laborarbeit 3. Die Messung des hydrostatischen Drucks.	14
4.	Laborarbeit 4. Das Studium der Struktur der Flüssigkeitsströme.	17
5.	Laborarbeit 5. Die Bestimmung der Strömungsart.	21
6.	Laborarbeit 6. Die Illustration der Bernoulli Gleichung.	23
7.	Laborarbeit 7. Die Bestimmung der lokalen Energieverluste.	27
8.	Laborarbeit 8. Die Bestimmung der Energieverluste über die Länge.	29

# LABORARBEIT 1. DAS STUDIUM DER PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN VON FLÜSSIGKEITEN

**Das Arbeitsziel.** Die Aneignung von Techniken zur Messung der Dichte, der Ausdehnung unter Temperatureinwirkung, der Zähigkeit und der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit.

## 1.1. Allgemeine Angaben

Unter *Flüssigkeit* versteht man einen schwach zusammengesetzten Körper, der seine Form unter der Wirkung von sehr kleinen Kräften ändert. Die Hauptcharakteristiken einer Flüssigkeit sind Dichte, Komprimierbarkeit, Ausdehnung unter Temperatureinwirkung, Zähigkeit und Oberflächenspannung.

*Dichte* ist das Verhältnis der Masse  $m$  einer Flüssigkeit zu ihrem Volumen  $W$ :  $\rho = m/W$ .

*Komprimierbarkeit* ist die Eigenschaft der Flüssigkeit, ihren Volumen unter der Druckwirkung zu verändern. Sie wird durch den *Koeffizient der Komprimierbarkeit*  $\beta_P$  bewertet, der die relative Verringerung des Volumens  $W$  bei der Erhöhung des Druckes  $p$  auf eine Einheit zeigt:  $\beta_P = (\Delta W/W) / \Delta p$ .

*Ausdehnung unter Temperatureinwirkung* ist die Eigenschaft einer Flüssigkeit, ihr Volumen bei Erwärmung zu verändern. Sie wird durch den *Koeffizient der Ausdehnung unter Wärmeeinwirkung*  $\beta_T$  charakterisiert, der dem relativen Zuwachs des Volumens  $W$  mit der Veränderung der Temperatur  $T$  pro Grad bei konstantem Druck gleich ist:  $\beta_T = (\Delta W/W) / \Delta T$ . In der Regel wird das Volumen einer Flüssigkeit bei Erwärmung größer.

*Zähigkeit* ist die Eigenschaft einer Flüssigkeit, dem relativen Gleiten ihrer Schichten zu widerstehen. Sie wird durch den *dynamischen Koeffizient der Zähigkeit*  $\mu$  bewertet, der in Pascal-Sekunden (Pas) gemessen wird und der Berührungsspannung zwischen den Nachbarschichten gleich ist, wenn ihre relative Bewe-

gungsgeschwindigkeit mit der Schichtdicke zahlenmäßig übereinstimmt. Der kinematische Koeffizient der Zähigkeit  $\nu$  wird aus der Formel  $\nu = \mu / \rho$  bestimmt und mit den Quadratmetern in einer Sekunde ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) oder mit Stokes ( $1 \text{ Stokes} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) gemessen. Diese Koeffizienten werden durch die Flüssigkeitsart bestimmt, sind von der Strömungsgeschwindigkeit nicht abhängig, werden mit der Erhöhung der Temperatur wesentlich kleiner.

*Oberflächenspannung* ist die Eigenschaft einer Flüssigkeit, eine Oberflächenschicht durch die sich gegenseitig anziehenden Moleküle zu bilden. Sie wird durch den Koeffizient der Oberflächenspannung  $\sigma$  charakterisiert, der der Kraft auf einer Einheit der Konturlänge der freien Oberfläche gleich ist. Die Werte  $\rho$ ,  $\beta_P$ ,  $\beta_T$ ,  $\nu$  und  $\sigma$  bei  $20^\circ\text{C}$  sind in der Tabelle 1.1 angegeben.

Tabelle 1.1

Flüssigkeit	$\rho$ , $\text{kg}/\text{m}^3$	$\beta_P \cdot 10^3$ , $\text{MPa}^{-1}$	$\beta_T \cdot 10^3$ , $^\circ\text{C}^{-1}$	$\nu \cdot 10^6$ , $\text{m}^2/\text{s}$	$\sigma \cdot 10^3$ , $\text{H}/\text{m}$
Süßwasser	998	0,49	0,15	1,01	73
Äthylalkohol	790	0,78	1,10	1,52	23
Öl:					
Motorenöl M-10	900	0,60	0,64	800	25
Industrieöl 20	900	0,72	0,73	110	25
Umspannöl	890	0,60	0,70	30	25
Hydraulik-Öl	für	850	0,76	20	25
Flugzeuge - 10					

## 1.2. Beschreibung des Behälters 1

Der Behälter für das Studium der physikalischen Eigenschaften einer Flüssigkeit enthält 5 Geräte, die sich in einem transparenten Gehäuse befinden (die Abb. 1.1), und an dem auch die für die Versuchsdurchführung benötigten Kennwerte ablesbar sind. Die Geräte 3-5 gehen nach Wenden des Behälters 1 in Betrieb. Das Thermometer 1 zeigt die Umgebungstemperatur und folglich die Temperatur der Flüssigkeiten in allen Behältern.

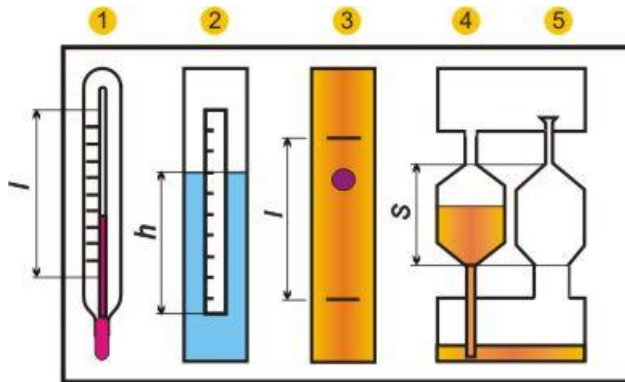


Abb. 1.1. Das Schema des Behälters 1:

1 - Thermometer; 2 - Areometer; 3 – Stokes Viskosimeter;  
4 - Kapillarviskosimeter; 5 - Tensiometer

### 1.3. Versuchsdurchführung

#### 1.3.1. Die Bestimmung des Koeffizienten der Flüssigkeitsausdehnung unter Wärmeeinwirkung

*Thermometer 1* hat als klassisches Flüssigkeitsthermometer einen Glasballon mit einer Kapillare, die mit thermometrischer Flüssigkeit gefüllt sind und eine Skala. Sein Wirkungsprinzip beruht auf der Flüssigkeitsausdehnung unter Wärmeeinwirkung. Die Änderung der Umgebungstemperatur ruft die entsprechende Volumenänderung der thermometrischen Flüssigkeit und ihres Standes in der Kapillare hervor. Der Flüssigkeitsstand weist auf der Skala auf die Temperatur hin.

Der Koeffizient der Ausdehnung der thermometrischen Flüssigkeit unter Wärmeeinwirkung wird in folgender Reihenfolge auf Grund des möglichen Experimentes bestimmt, d.h. es ist ange-

nommen, dass die Umgebungstemperatur von der unteren (Null) bis zur oberen Grenzanzeige des Thermometers erhöht wurde, und der Flüssigkeitsstand in der Kapillare auf die Größe  $l$  gestiegen ist.

1. Die Gesamtzahl der Teilstriche  $\Delta T$  an der Termometerskala zusammenrechnen und den Abstand  $l$  zwischen den äußersten Skalastrichen messen.

2. Den Zuwachs des Volumens der thermometrischen Flüssigkeit  $\Delta W = \pi r^2 l$  berechnen, wobei  $r$  – der Radius der Kapillare des Thermometers ist.

3. Unter Berücksichtigung des Anfangsvolumens (bei  $0^\circ\text{C}$ ) der thermometrischen Flüssigkeit  $W$  den Wert des Koeffizienten der Flüssigkeitsausdehnung unter Wärmeeinwirkung  $\beta_T = (\Delta W/W) / \Delta T$  bestimmen und ihn mit dem Tabellenwert  $\beta_T^*$  (Tabelle 1.1) vergleichen. Die Werte der angewandten Größen in die Tabelle 1.2 eintragen.

Tabelle 1.2

Flüssigkeitsart	$r$ , cm	$W$ , $\text{cm}^3$	$\Delta T$ , $^\circ\text{C}$	$l$ , cm	$\Delta W$ , $\text{cm}^3$	$\beta_T$ , $^\circ\text{C}^{-1}$	$\beta_T^*$ , $^\circ\text{C}^{-1}$
Spiritus							

### 1.3.2. Die Messung der Flüssigkeitsdichte mit dem Areometer

Das *Areometer 2* dient der Bestimmung der Flüssigkeitsdichte mit der Schwimmkörpermethode. Es stellt einen Hohlzylinder mit einer Millimeterskala und einer Last im unteren Teil dar. Dank der Last schwimmt das Areometer in der zu untersuchenden Flüssigkeit in senkrechter Lage. Die Eintauchtiefe des Areometers ist die Maßeinheit der Flüssigkeitsdichte und wird von der Skala an dem oberen Rand des Meniskus der Flüssigkeit rings um das Areometer abgelesen. In gewöhnlichen Areometern zeigt die Skala die Dichte.

Zur Versuchsdurchführung müssen folgende Handlungen ausgeführt werden.

1. Die Eintauchtiefe des Areometers  $h$  an seiner Millimeterskala messen.

2. Die Flüssigkeitsdichte nach der Formel  $\rho = 4m/(\pi d^2 h)$  berechnen, wobei  $m$  und  $d$  – die Masse und der Durchmesser des Areometers sind. Diese Formel entsteht durch das Gleichsetzen der Gewichtskraft des Areometers  $G=mg$  mit der Auftriebskraft (Archimedeskraft)  $P_A=\rho g W$ , wobei das Volumen des eingetauchten Teils des Areometers nach der Formel  $W=(\pi d^2/4)h$  berechnet wird.

3. Den experimentell ermittelten Dichtewert  $\rho$  mit dem Tabellenwert  $\rho^*$  (Tabelle 1.1) vergleichen. Die Werte der angewandten Größen in die Tabelle 1.3 eintragen.

Tabelle 1.3

Flüssigkeitsart	$m, g$	$d, cm$	$h, cm$	$\rho, g/cm^3$	$\rho^*, g/cm^3$
Wasser					

### 1.3.3. Die Bestimmung der Zähigkeit mit dem Stokes Viskosimeter

Das Stokes Viskosimeter 3 ist einfach. Es besteht aus einem zylindrischen Behälter, der mit der zu untersuchenden Flüssigkeit ausgefüllt ist, und einer Kugel. Mit diesem Gerät lässt sich die Zähigkeit der Flüssigkeit durch die Zeit bestimmen, die eine Kugel braucht, um eine bestimmte Strecke durch die Flüssigkeit zu fallen.

1. Den Behälter 1 in senkrechter Fläche um  $180^\circ$  wenden und die Zeit  $t$  des Hindurchgleitens der Kugel zwischen zwei Marken mit dem Abstand  $l$  im Gerät 3 mit einer Stoppuhr festhalten. Die Kugel soll entlang der Behälterachse fallen, ohne die Wände zu berühren. Das Experiment dreimal durchführen und danach das arithmetische Mittel der Zeit  $t$  bestimmen.

2. Den experimentalen Wert des kinematischen Koeffizienten der Flüssigkeitszähigkeit nach der Formel berechnen:

$$\nu = g d^2 t (\rho_{ul}/\rho - 1) / [18l + 43.2l (d/D)],$$

wobei  $g$  – Beschleunigung des Freifalls ist;  $d, D$  – Durchmesser der Kugel und des zylindrischen Behälters;  $\rho, \rho_{uu}$  – Dichte der Flüssigkeit und des Kugelstoffes.

3. Den experimentell ermittelten Wert des Koeffizienten der Zähigkeit  $\nu$  mit dem Informationswert  $\nu^*$  (Tabelle 1.1) vergleichen. Die Werte der angewandten Größen in die Tabelle 1.4 eintragen.

Tabelle 1.5

Flüssigkeitsart	$\rho, \text{kg/m}^3$	$t, \text{s}$	$l, \text{m}$	$d, \text{m}$	$D, \text{m}$	$\rho_{uu}, \text{kg/m}^3$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$\nu^*, \text{m}^2/\text{s}$
M-10					0,02			

### 1.3.4. Messung der Zähigkeit mit dem Kapillarviskosimeter

*Kapillarviskosimeter* 4 stellt einen Behälter mit einer Kapillare dar. Die Zähigkeit wird durch die Zeit des Herausfließens der Flüssigkeit aus dem Behälter durch die Kapillare bestimmt.

1. Den Behälter 1 (Abb. 1.1) wenden und die Zeit  $t$  des durch die Kapillare herausfließenden Flüssigkeitsvolumens zwischen den Marken (Höhe  $S$ ) des Viskosimeters 4 mit einer Stoppuhr und die Temperatur  $T$  mit dem Thermometer 1 bestimmen.

2. Den Wert des kinematischen Koeffizienten der Zähigkeit  $\nu = M t$  ( $M$  – Konstante des Gerätes) ausrechnen und ihn mit dem Tabellenwert  $\nu^*$  (Tabelle 1.1) vergleichen. Die Angaben in die Tabelle 1.5 eintragen.

Tabelle 1.5

Flüssigkeitsart	$M, \text{m}^2/\text{s}^2$	$t, \text{s}$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\nu^*, \text{m}^2/\text{s}$
M-10					

Anmerkung. In der Tabelle 1.1 sind die Werte des Koeffizienten der Zähigkeit bei der Temperatur  $20\text{ }^\circ\text{C}$  angegeben. Deshalb können sich die bei einer anderen Temperatur experimentel ermittelten Werte von den Tabellenwerten wesentlich unterscheiden.

### 1.3.5. Messung der Oberflächenspannung mit dem Tensiometer

*Tensiometer 5* dient der Bestimmung der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit durch die Tropfenlösmethode und stellt einen Behälter mit einer Kapillare dar, die am Ende ausgehöhlt ist, um Flüssigkeit in Tropfenform anzusammeln. Die Kraft der Oberflächenspannung im Moment der Tropfenlösung ist ihrem Gewicht (der Schwerkraft) gleich und wird deshalb nach der Flüssigkeitsdichte und der Tropfenzahl bestimmt, die sich bei der Leerung des Behälters mit dem vorgegebenen Volumen ergibt.

1. Den Behälter 1 wenden und die im Tensiometer 5 aus dem Volumen mit der Höhe  $S$  zwischen zwei Merkzeichen ergebene Tropfenzahl zählen. Das Experiment dreimal wiederholen und das arithmetische Mittel der Tropfenzahl  $n$  ausrechnen.

2. Den experimentell ermittelten Wert des Koeffizienten der Oberflächenspannung bestimmen  $\sigma = K\rho/n$  ( $K$  – Konstante des Tensiometers) und ihn mit dem Tabellenwert  $\sigma^*$  (Tabelle 1.1) vergleichen. Die Angaben in die Tabelle 1.6 eintragen.

Tabelle 1.6

Flüssigkeitsart	$K, \text{m}^3/\text{s}^2$	$\rho, \text{kg}/\text{m}^3$	$n$	$\sigma, \text{H}/\text{m}$	$\sigma^*, \text{H}/\text{m}$
M-10					

## LABORARBEIT 2. DAS STUDIUM DER DRUCKMESSGERÄTE

**Arbeitsziel.** Das Studium der Struktur und des Funktionsprinzips der Flüssigkeitsdruckmessgeräte.

### 2.1. Allgemeine Angaben

Als *hydrostatischen Druck* bezeichnet man eine normale Druckspannung in einer unbeweglichen Flüssigkeit, d.h. die Kraft,

die auf eine Flächeneinheit der Oberfläche wirkt. Für die Einheit der Druckmessung erhält man im Internationalen Einheitensystem Pascal ( $\text{Pa} = \text{N}/\text{M}^2$ ).

Man unterscheidet einen absoluten, atmosphärischen, manometrischen und vakuummetrischen Druck.

*Der absolute (volle) Druck  $p$*  wird vom absoluten Vakuum abgezählt. *Der Luftdruck  $p_a$*  wird mit der Schwerkraft der Atmosphärenluft gebildet und ist in gewöhnlichen Verhältnissen 101325 Pa oder 760 mm Hg gleich. Ein Übermaß von Druck über dem Luftdruck nennt man *manometrischen Druck (Überdruck) ( $p_M = p - p_a$ )*, und den Mangel an Druck bis zum Luftdruck – *vakuummetrischen Druck ( $p_v = p_a - p$ )*.

Geräte für die Luftdruckmessung wurden *Barometer*, für die Messung des manometrischen Drucks *Manometer*, für die Vakuummessung *Vakuummeter* genannt. Nach dem Wirkungsprinzip und dem Typ des Triebelementes werden die Geräte in mechanische, elektrische und Flüssigkeitsgeräte eingeteilt.

*Die Flüssigkeitsgeräte* wurden geschichtlich als erste in Betrieb genommen. Ihre Wirkung beruht auf dem Prinzip des Ausgleichs des zu messenden Drucks  $p$  mit der Schwerkraft der Flüssigkeitssäule mit der Höhe  $h$  im Gerät:

$$p = \rho g h,$$

wobei  $\rho$  - die Flüssigkeitsdichte;

$g$  – Beschleunigung des Freifalls sind.

Deshalb kann die Druckgröße durch die Höhe der Flüssigkeitssäule  $h$  (mm Hg, m WS) ausgedrückt werden. Die Vorteile der Flüssigkeitsgeräte sind eine einfache Konstruktion und hohe Präzision, sie sind aber nur für die Messung kleiner Drücke nützlich.

In *mechanischen Geräten* führt der zu messende Druck zu einer Deformierung des fühlenden Elementes (Rohr, Membran, Wellrohr), die mit Hilfe spezieller Mechanismen auf den Anzeiger übertragen wird. Solche Geräte sind kompakt und haben einen großen Meßbereich.

In *elektrischen Geräten* wird der von einem Sensor wahrgenommene Druck in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das Signal kann angezeigt werden (Voltmeter, Amperemeter) oder von einem Drucker (Selbstschreiber, Oszillograph) geschrieben werden. Der Druck ermöglicht das Festhalten von schnell verlaufenden Prozessen.

## 2.2. Beschreibung des Behälters 2 und der Flüssigkeitsgeräte

Das *Quecksilberbarometer* besteht aus einem senkrechten mit Quecksilber gefüllten Glasrohr mit einer Skala, das am oberen Ende verschlossen ist, und aus einer Schale mit Quecksilber, in die das untere Ende des Rohres gesenkt ist. Mit einem solchen Gerät wurde im Jahre 1642 von einem italienischen Wissenschaftler E. Torricelli der Luftdruck gemessen.

Für die Vorführung anderer Geräte dient *der Behälter 2*, der transparent ist. Er hat einen Hohlraum 1 mit gleichbleibendem Luftdruck, und ein Reservoir 2, das teilweise mit Wasser gefüllt ist (Abb. 2.1, a). Der Messung des Druckes und des Flüssigkeitsstandes im Reservoir 2 dienen die Flüssigkeitsgeräte 3, 4 und 5. Sie stellen transparente senkrechte Kanäle mit Skalen dar.

Das *Einrohrmanometer (Piezometer)* 3 ist am oberen Ende mit der Atmosphäre verbunden und am unteren Ende mit dem Reservoir 2. Damit wird der manometrische Druck  $p_M = \rho g h_M$  auf dem Boden des Reservoirs bestimmt.

*Der Flüssigkeitsstandmesser* ist mit seinen beiden Enden mit dem Reservoir verbunden und dient der Messung des Flüssigkeitsstandes in ihm.

Das *Mano- Vakuummeter* 5 stellt einen U-förmigen Kanal dar, der teilweise mit Flüssigkeit gefüllt ist. Mit dem linken Arm ist er an das Reservoir 2, und mit dem rechten – an den Hohlraum 1 angeschlossen und ist für die Bestimmung manometrisches  $p_{M0} = \rho g h_M$  (Abb. 2.1, a) oder vakuummetrisches  $p_{B0} = \rho g h_B$  (Abb. 2.1, b) Drucks über der freien Flüssigkeitsfläche im Reservoir 2 bestimmt.

Der Druck im Reservoir lässt sich mit der Neigung des Behälters ändern.

Bei der Wendung des Behälters um  $180^\circ$  entgegen der Uhrzeigerrichtung (Abb. 2.1, c) bleibt der Kanal 4 der Flüssigkeitsstandmesser, der Arm des Mano- Vakuummeters 5 wird in das Piesometer 6, und das Piesometer 3 – ins *Vakuummeter (Rückpiezometer)* 7 tarnsformiert, das der Bestimmung des Vakuums  $p_{Bo} = \rho g h_b$  über der freien Flüssigkeitsoberfläche im Reservoir 2 dient.

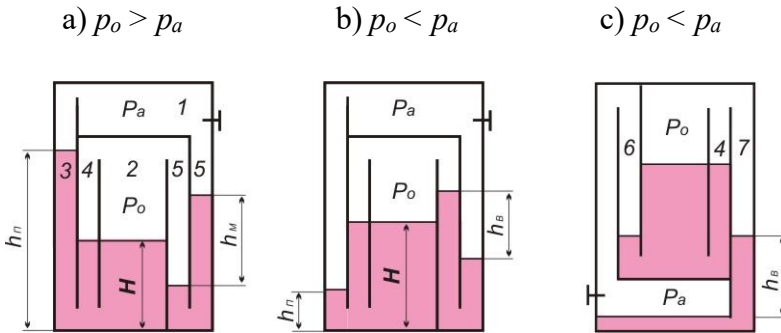


Abb. 2.1. Schema des Behälters 2:

- 1 – Höhle mit dem Luftdruck; 2 – das experimentelle Reservoir; 3 - Piezometer; 4 - Standesmesser; 5 – Mano- Vakuummeter; 6 – Piezometer; 7 – Vakuummeter

## LABORARBEIT 3. DIE MESSUNG DES HYDROSTATISCHEN DRUCKS

**Das Arbeitsziel.** Die Erlangung der Fertigkeiten in der Druckmessung mit Flüssigkeitsgeräten.

### 3.1. Allgemeine Angaben

Der absolute Druck in jedem Punkt einer ruhenden Flüssigkeit wird nach der *Hauptgleichung der Hydrostatik* bestimmt

$$p = p_o + \rho g H,$$

wobei  $p_o$  – der absolute Druck auf der freien Flüssigkeitsoberfläche;

$\rho$  - die Flüssigkeitsdichte;

$H$  – die Eintauchtiefe des Punktes über der freien Oberfläche sind.

Im Laufe der Laborarbeit wird der Druck im vorgegebenen Punkt (z.B. auf dem Boden des Reservoirs) nach den Angaben verschiedener Geräte berechnet, danach werden die auf zwei Weisen erhaltenen Ergebnisse mit einander verglichen.

### 3.2. Versuchsdurchführung

1. Im Reservoir 2 über der Flüssigkeit den Druck schaffen, der höher als der Luftdruck ist ( $p_o > p_a$ ), wovon Höhendifferenz im Piezometer 3 zum Flüssigkeitsstand im Reservoir und die Höhendifferenz der Flüssigkeit im Mano- Vakuummeter 5 zeugt (Abb. 2.1, a). Dafür den Behälter auf die rechte Seite stellen, entgegen der Uhrzeigerrichtung drehen und auf solche Weise einen Teil der Flüssigkeit aus dem linken Arm des Mano- Vakuummeters 5 ins Reservoir 2 abgießen.

2. Den Wert des Piezometers  $h_n$ , des Wasserstandsmessers  $H$  und des Mano- Vakuummeters  $h_m$  ablesen.

3. Den absoluten Druck auf dem Boden des Reservoirs durch die Angaben des Piezometers, und dann – durch die mit dem Standesmesser und dem Mano- Vakuummeter gemessenen Größen ausrechnen. Für die Bewertung der Übereinstimmung der Ergebnisse der Druckmessung auf dem Boden des Reservoirs auf zwei Weisen den relativen Meßfehler  $\delta p$  berechnen.

4. Über der freien Flüssigkeitsoberfläche im Reservoir 2 ein Vakuum schaffen ( $p_o < p_a$ ), wenn der Flüssigkeitsstand im Piezometer 3 niedriger als im Reservoir wird und auf dem Mano- Vakuummeter 5 die Rückhöhdifferenz  $h_g$  erscheint (Abb.2.1, b). Dafür den Behälter auf die linke Seite stellen, rechts biegen und einen Teil der Flüssigkeit aus dem Reservoir 2 in den linken Arm des

Mano- Vakuummeters 5 abgießen. Weiter die in den Punkten 2 und 3 angegebenen Handlungen wiederholen.

5. Den Behälter entgegen der Uhrzeigerrichtung wenden (Abb. 2.1, c) und den manometrischen oder den vakuummetrischen Druck im vom Lehrer angegebenen Punkt *C* durch die Angaben des Piezometers 6 bestimmen. Das Ziel ist, den Druck aus den Angaben des Rückpiezometers 7 und des Flüssigkeitsstandmessers 4 zu berechnen.

6. Die Ergebnisse in die Tabelle 2.1 eintragen.

Tabelle 2.1

№	Größen	Bezeichnungen, Formeln	Versuchsbedin- gungen	
			$P_o > P_a$	$P_o < P_a$
1.	Piezometrische Höhe, m	$h_n$		
2.	Flüssigkeitsstand im Re- servoir, m	$H$		
3.	Manometrische Höhe, m	$h_m$		-----
4.	vakuummetrische Höhe, m	$h_e$	-----	
5.	Absoluter Druck auf dem Boden des Reservoirs nach der Anzeige des Pie- zometers, Pa	$p = p_a + \rho g h_n$		
6.	Absoluter Druck im Re- servoir über der Flüssig- keit, Pa	$p_o = p_a + \rho g h_m$ $p_o = p_a - \rho g h_e$		-----
7.	Absoluter Druck auf dem Boden des Reservoirs nach den Anzeigen des Mano- Vakuummeters und des Flüssigkeits- standmessers, Pa	$p^* = p_o + \rho g H$	-----	
8.	Relativer Meßfehler in den Ergebnissen der Druckbestimmung auf dem Boden des Reser- voirs, %	$\delta p = 100(p - p^*) / p$		

Anmerkung. Den Luftdruck als  $p_a = 101325$  Pa, die Wasserdichte als  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> annehmen.

## LABORARBEIT 4. DAS STUDIUM DER STRUKTUR DER FLÜSSIGKEITSSTRÖME

**Das Arbeitsziel.** Beobachtung der Flüssigkeitsströme mit verschiedener Struktur und Feststellung der die Struktur beeinflussenden Faktoren.

### 4.1. Allgemeine Angaben

Man unterscheidet zwei Hauptarten der Flüssigkeitsströmung: eine *laminare* (geschichtete) und eine *turbulente* (wirbelartige). Bei der laminaren Strömungsart bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen auf den parallelen Bahnen, ohne sich zu vermischen, deshalb hat die Strömung eine Schichtstruktur, d.h. die Flüssigkeit bewegt sich mit Einzelschichten. Die turbulente Strömungsart wird durch das Pulsieren des Druckes und der Teilchengeschwindigkeiten charakterisiert, was eine intensive Vermischung der Flüssigkeiten im Strom, d.h. eine Wirbelbewegung hervorruft.

Bei der starken Veränderung des Querschnittes oder der Kanalrichtung geht *ein Transitstrahl* von seiner Wandung ab, und die Flüssigkeit an der Wandung bewegt sich in einer anderen Richtung, dabei bringt sie die Flüssigkeiten zwischen dem Transitstrahl und der Wandung in Drehung. Dieses Gebiet heißt *Zirkulationszone* (Turbulenz).

Für Visualisierung der Strömungen werden gezeichnete Teilchen (z.B., Aluminiumteilchen) oder gefärbte (z.B., mit Tinte oder Tusche) Strahlen angewandt, die die *Bewegungsbahnen* einer Menge von Flüssigkeitsteilchen anzeigen. Sie heißen noch *Strömungslinien*, wenn die Bewegung fixiert ist. Bei der *fixierten* (ortfesten) *Strömung* sind die Mittelwerte der Geschwindigkeit und des Drucks in jedem Strömungspunkt in der Zeit konstant. In diesem Fall verändert sich die Durchflußmenge, d.h. die durch den angegebenen Schnitt in einer Zeiteinheit durchgehende Flüssigkeitsmenge, in der Zeit nicht.

## 4.2. Beschreibung des Behälters 3

Der Behälter 3 hat ein transparentes Gehäuse (Abb. 4.1, a), Behälter 1 und 2 mit der Beruhigungswandung 3 für die Löschung der durch das Strahlfallen und das Auftauchen der Luftblasen hervorgerufenen Verwirbelung in einer Flüssigkeit. Die Behälter sind durch Kanäle 4 und 5 mit gleichen Querschnitten mit einander verbunden. Das Ende des Kanals 4 ist mit einer Scheidewand mit einer Spalte, und das gegenüberliegende Ende des Kanals 5 – mit einem Gitter (einer Scheidewand mit einer Menge von Spalten) 7 versorgt. Der Behälter ist mit Wasser gefüllt, das mit mikroskopisch kleinen Aluminiumteilchen versetzt ist, um die Strömung sichtbar zu machen. Der Wasserstand im Behälter 2 wird mit der Skala 8 gemessen.

Die Einrichtung funktioniert auf folgende Weise. In den Lagern des Behälters (Abb. 4.1, a, b) verdrängt das durch den linken Kanal in den unteren Behälter fließende Wasser die blasenförmige Luft in den oberen Behälter. Deshalb werden die Drücke am Kanaleingang (auf dem Boden des oberen Behälters) und über der Flüssigkeit im unteren Behälter gleich, und der Ausfluß geschieht unter der Wirkung des mit der Flüssigkeitssäule im linken Kanal gebildeten konstanten Drucks  $H$ . So bleibt die Flüssigkeitsbewegung (und damit auch die Durchflußmenge) konstant. Dabei wird im Kanal 4 dank der kleinen Strömungsgeschwindigkeiten bei großem Druck in der Spalte 6 eine laminare Strömungsart erreicht. Der kleine hydraulische Druck am Gitter 7 versorgt wegen der hohen Geschwindigkeiten eine turbulente Strömung im Kanal 5 (Abb. 4.1, b). Die Durchflußmenge kann man durch Neigung des Behälters nach hinten verringern.

In den auf der Abbildung 4.1, c, d, e angegebenen Fällen entsteht in den Kanälen 4 und 5 wegen der unmittelbaren Verbindung der Lufthöhlen der Behälter eine nicht konstante wechselnde (bei wechselndem Druck und Durchfluß) Flüssigkeitenbewegung. Dadurch kann die Veränderung der Struktur der Strömungen im

Laufe der Verringerung ihrer Geschwindigkeit bis Null kontrolliert werden.

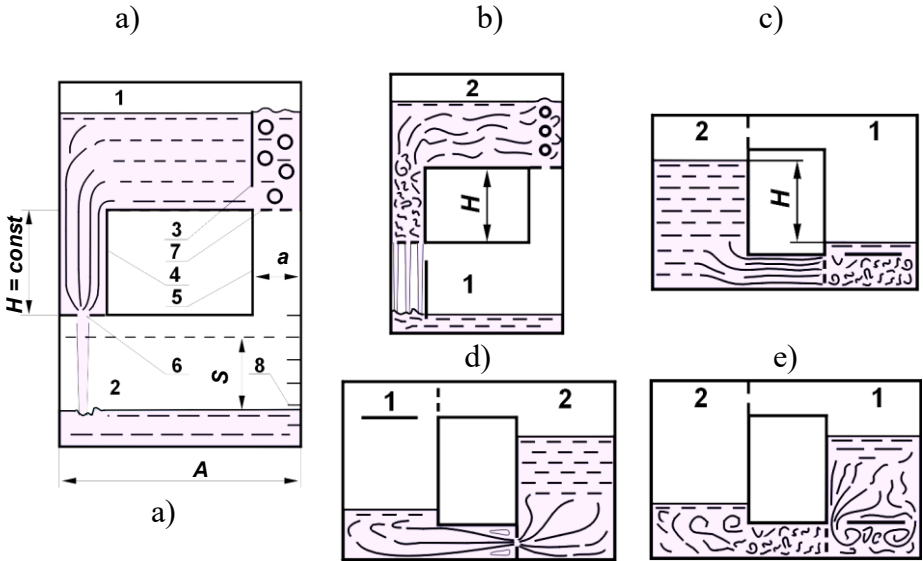


Abb. 4.1. Das Schema des Behälters 3:

- 1, 2- Behälter; 3 - Scheidewand; 4, 5 - Experimentalkanäle;
- 6 - Spalte; 7 - Gitter; 8 - die Skala für die Messung des Flüssikeitsstandes

### 4.3. Versuchsdurchführung

1. Im Kanal 4 eine laminare Flüssigkeitsströmung schaffen. Dafür muss man bei dem mit Wasser gefüllten Behälter 1 die Einrichtung mit dem Behälter 2 auf den Tisch stellen (Abb. 4.1, a). Die Strömungsstruktur beobachten.

2. Den Behälter auf den Kopf stellen (Abb. 4.1, b). Die turbulente Strömung im Kanal 5 beobachten.

3. Bei dem mit Wasser gefüllten Behälter 2 die Einrichtung so stellen, dass der Kanal 5 (mit dem Gitter) die untere waagerechte Stellung einnimmt (Abb. 4.1, c). Den Übergang von der turbulenten zur laminaren Strömung beobachten. Dabei muss man da-

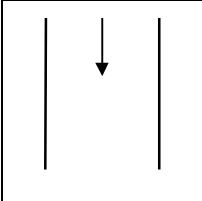
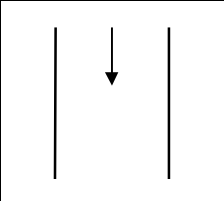
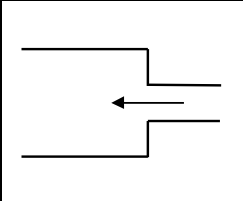
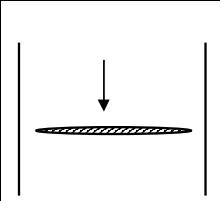
rauf achten, dass das Gitter zur Turbulenz des hinter ihm fließenden Stromes führt.

4. Bei dem mit Wasser gefüllten Behälter 2 die Einrichtung so verändern, dass der Kanal 4 (mit der Spalte) die untere waagerechte Stellung einnimmt (Abb. 4.1, d). Die Strömungsstruktur im Behälter 2 bei der plötzlichen Verengung, der plötzlichen Ausdehnung im Kanal hinter der Spalte und beim Strömungsausgang aus dem Kanal in den Behälter 1 beobachten. Dabei muss man auf die Turbulenzen, den Transitstrahl und die Verbindung der Geschwindigkeiten mit den Flächen der unterschiedlichen Kanalquerschnitte achten.

5. Bei dem gefüllten Behälter 1 die Strömungsstruktur beim Umfließen der Scheidewand 3 (Abb. 4.1, e) beobachten.

6. Eine Zeichnung von der Strömungsstruktur für die in der Tabelle 4.1 angegebenen Fälle machen.

Tabelle 4.1

Laminare Strömungsart	Turbulente Strömungsart	Ausdehnung der Strömung	Umfließen der Scheidewand
			

## LABORARBEIT 5. DIE BESTIMMUNG DER STRÖMUNGSART

**Das Arbeitsziel.** Die Meisterung der Rechnungsmethode der Bestimmung der Strömungsart.

### 5.1. Allgemeine Angaben

Das Kriterium für die Strömungsart ist *die Reynoldssche Zahl*

$$Re = Vd / \nu, \quad (4.1)$$

wobei  $V$  – die Durchschnittsgeschwindigkeit der Strömung;  
 $d$  – die Rohrweite (die Kanalweite);  
 $\nu$  – der kinematische Koeffizient der Flüssigkeitszähigkeit  
sind.

In der Ingenieurpraxis wird die Strömungsart durch den Vergleich der Reynoldsschen Zahl  $Re$  mit ihrer kritischen Bedeutung  $Re_{\kappa}$  bestimmt, die dem Wechsel der Art der Flüssigkeitsbewegung entspricht. Für gleichmäßige Flüssigkeitsströmungen in den Röhren (Kanälen) mit dem Rundprofil nimmt man  $Re_{\kappa} = 2300$ . Die Strömungsart ist laminar, wenn  $Re < Re_{\kappa}$ , und turbulent bei  $Re \geq Re_{\kappa}$ .

Aus der Behauptung (4.1) folgt, dass die Reynoldsschen Zahlen gering sind, und folglich ist die Strömungsart bei geringen Geschwindigkeiten in Kanälen mit geringem Rundprofil (in Grundfeinporen, in Kapillaren) oder bei der Flüssigkeitsbewegung mit großer Zähigkeit (Öl, Erdöl, Bitumen) laminar.

Die turbulente Strömungsart kommt in der Natur und Technik öfter vor. Wasserbewegung in Flüssen, Bächen, Kanälen, Systemen der Wasserversorgung und Wasserableitung, auch Benzin-, Kerosinströmung und die Strömung anderer wenig zähen Flüssigkeiten in Röhren unterliegen diesen Gesetzmäßigkeiten.

## 5.2. Versuchsdurchführung

1. Durch Neigung des Behälters 3 nach hinten eine Flüssigkeitsströmung im Kanal 4 erzeugen (Abb. 4.1, a).

2. Die Zeit  $t$  der Bewegung des Flüssigkeitsstandes im Behälter im Abstand  $S$  messen und die Angaben des Thermometers  $T$  ablesen, das sich im Behälter 1 befindet.

3. Die Reynoldsschen Zahl nach den Angaben der Tabelle 5.1 abrechnen.

4. Den Behälter in seiner Fläche um  $180^{\circ}$  wenden (Abb. 4.1, b) und die in Punkten 2, 3 angegebenen Handlungen ausführen.

5. Die ergebnen Werte der Reynoldschen Zahlen mit einander vergleichen und dann auf Grund der Vergleichung mit dem kritischen Wert Schlußfolgerungen über der Strömungsart machen.

Tabelle 5.1

№	Größen	Bezeichnungen, Formeln	№ der Unter- suchung	
			1	2
1.	Veränderung des Wasserstandes im Behälter, cm	$S$		
2.	Beobachtungszeit des Wasserstandes, s	$t$		
3.	Temperatur des Wassers, °C	$T$		
4.	Der kinematische Koeffizient der Wasserzähigkeit, cm <sup>2</sup> /s	$\nu = 17.9/(1000 + 34T + 0.22T^2)$		
5.	Das Volumen des in der Zeit $t$ in den Behälter eingedrungenen Wasser, cm <sup>3</sup>	$W = A B S$		
6.	Wasserverbrauch, cm <sup>3</sup> /s	$Q = V/t$		
7.	Die Mittelgeschwindigkeit im Kanal, cm/s	$V = Q/\omega$		
8.	Die Reynoldsche Zahl	$Re = Vd/\nu$		
9.	Die Benennung der Strömungsart	$Re (< >) Re_{\kappa} = 2300$		

$A = \dots$  cm;  $B = \dots$  cm;  $d = \dots$  cm;  $\omega = \dots$  cm<sup>2</sup>

Anmerkung. Die Größen des Profils des Behälters (A, B), der hydraulische Durchmesser  $d$  und die Fläche des Profils  $\omega$  in den experimentellen Kanälen sind auf dem Gehäuse des Behälters 3 anegeben.

## LABORARBEIT 6. DIE ILLUSTRATION DER BERNOULLI GLEICHUNG

**Das Arbeitsziel.** Experimentelle Bestätigung der Bernoulli Gleichung, d.h. der Reduktion der mechanischen Energie mit dem Strom und des Übergangs der potenziellen Energie in die kinetische und zurück (Verbindung des Drucks mit der Geschwindigkeit).

### 6.1. Allgemeine Angaben

Die Bernoulli Gleichung drückt den Erhaltungssatz der Energie aus und wird für zwei Strömungsprofile einer realen Flüssigkeit in der vereinfachten Art so geschrieben:

$$P_1/(\rho g) + V_1^2/(2g) = P_2/(\rho g) + V_2^2/(2g) + h_{TP},$$

wobei  $P$  – Druck;  $V$  – Durchschnittsgeschwindigkeit der Strömung im Querschnitt;  $\rho$  – Flüssigkeitsdichte;  $g$  – Beschleunigung des Freifalls;  $h_{TP}$  – summarische Druckverluste wegen der Überwältigung der hydraulischen Reibeskkräfte zwischen den Querschnitten 1-1 und 1-2; Indexe «1» und «2» geben die Nummer des Querschnittes an, auf den sich die Größe bezieht.

Die Summanden der Gleichung drücken die auf eine Flüssigkeitseinheit (Schwerkraft) einwirkenden *Energien* aus, die in der Hydraulik *Drücke* genannt werden:  $P/(\rho g) = H_n$  – *piezometrischer Druck* (potenzielle Energie),  $V^2/(2g) = H_k$  – *Geschwindigkeitsdruck* (kinetische Energie),  $P/(\rho g) + V^2/(2g) = H$  – *voller Druck* (volle mechanische Flüssigkeitsenergie),  $h_{TP}$  – Druckverluste (mechanische Energie wegen ihrer Umwandlung in die Wärmeenergie). Solche Energien werden in Längeneinheiten gemessen, da  $\text{Joule}/H = Hm/H = m$ .

Aus der Gleichung folgt, dass die spezifische Gesamtenergie (inklusive der Wärmeenergie) wegen des nicht stattfindenden Wärmeaustauschs mit der Umgebung *entlang der Strömung* konstant bleibt. Die Änderung einer Energieart führt zur umgekehrten Änderung der anderen Energieart.

Das ist *der energetische Sinn* der Bernoulli Gleichung. Z.B., bei der Strömungsausdehnung werden die Geschwindigkeit  $V$  und folglich auch die kinetische Energie  $V^2/(2g)$  kleiner, was eine Vergrößerung der potenziellen Energie  $P/(\rho g)$  hervorruft, um die Bilanz zu bewahren. Anders gesagt, führt die Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit  $V$  mit dem Strom zum Anstieg des Drucks  $P$  und umgekehrt.

### 6.2. Die Beschreibung des Behälters 4.

Der Behälter 4 hat die Tanks 1 und 2, die mit einander durch die Experimentalkanäle von wechselndem 3 und konstantem 4 Querschnitts verbunden sind (Abb. 6.1). Die Kanäle sind mit einander durch die gleichmäßig angeordneten Piezometer  $I-V$  verbunden, die der Messung der piezometrischen Drücke in den charakteristischen Querschnitten dienen. Der Behälter ist mit gefärbtem Wasser gefüllt. In einem der Behälter gibt es eine Skala 5 für die Messung des Wasserstandes.

Bei der Wendung des Behälters wird die Wasserbewegung im unteren Kanal dank der stetigen Energie  $H_0$  beim Abfließen konstant. Der andere Kanal lässt in dieser Zeit die Luft durch, die von der Flüssigkeit aus dem unteren Behälter in den oberen verdrängt wird.

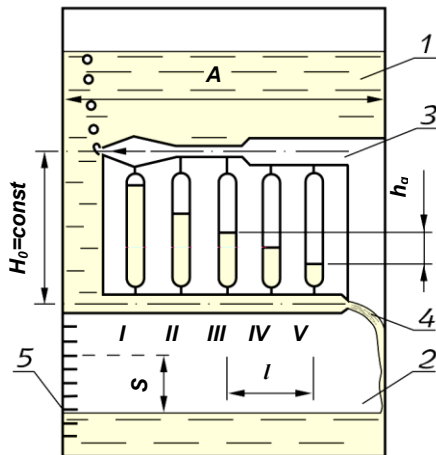


Abb. 6.1. Das Schema des Behälters 4:

1,2 – Tanks; 3,4 – Experimentalkanäle mit wechselndem und konstantem Querschnitt; 5 – Skala des Flüssigkeitsstandmessers; I-V – Piezometer

### 6.3. Versuchsdurchführung

1. Den Behälter mit dem mit Wasser gefüllten Tank 2 (Abb. 6.1) wenden, um eine Strömung im Kanal mit wechselndem Querschnitt 3 zu schaffen. .

2. Den Wert der Piezometer in unteren Teilen der Wasser-  
menisken in ihnen ablesen:  $H_{II}=P/(\rho g)$ .

3. Die Zeit  $t$  der Bewegung des Wasserstandes im Behälter auf die vorgegebene Größe  $S$  messen.

4. Nach den Querschnittsgrößen  $A$  und  $B$  des Behälters, der Bewegung des Wasserstandes  $S$  und nach der Zeit  $t$  den Verbrauch  $Q$  des Wassers im Kanal und danach den Geschwindigkeits-  $H_K$  und den Gesamtdruck  $H$  in den Profilen des Kanals nach der in der Tabelle 6.1 angegebenen Reihenfolge bestimmen.

Tabelle 6.1

№	Größen	Bezeichnungen, Formeln	Querschnitten des Kanals					
			I	II	III	IV	V	VI
1	Die Fläche des Querschnittes des Kanals, cm	$\omega$						
2	Die Durchschnittsgeschwindigkeit, cm/s	$V = Q/\omega$						
3	Der Piezometrische Druck, cm	$H_{II}=P/(\rho g)$						
4	Der Geschwindigkeitsdruck, cm	$H_K=V^2/(2g)$						
5	Der Gesamtdruck, cm	$H= P/(\rho g) + V^2/(2g)$						

$A = \dots$  cm;  $B = \dots$  cm;  $S = \dots$  cm;  $t = \dots$  s;  $Q = ABS / t = \dots$  cm<sup>3</sup>/s

5. Im verkleinerten Maßstab einen Kanal mit Piezometern (Abb. 6.2) zeichnen. Die Flüssigkeitsstände in Piesometern mit dem Zentrum des Ausgangsquerschnitts VI vereinigend, die *piezometrische Kurve* 1 zeichnen, die die Veränderung der potenziel-

len Energie (des Drucks) entlang der Strömung zeigt. Um eine *Druckkurve 2* (Linie der vollen mechanischen Energie) zu zeichnen, muss man von der Kanalachse die Gesamtdrücke  $H$  abtragen und die ergebnen Punkte verbinden.

6. Die Änderung der vollen machenischen  $H$ , potenziellen  $P/(\rho g)$  und kinetischen  $V^2/(2g)$  Energie der Flüssigkeit entlang der Strömung analysieren; die Übereinstimmung dieser Änderungen der Bernulli Gleichung feststellen.

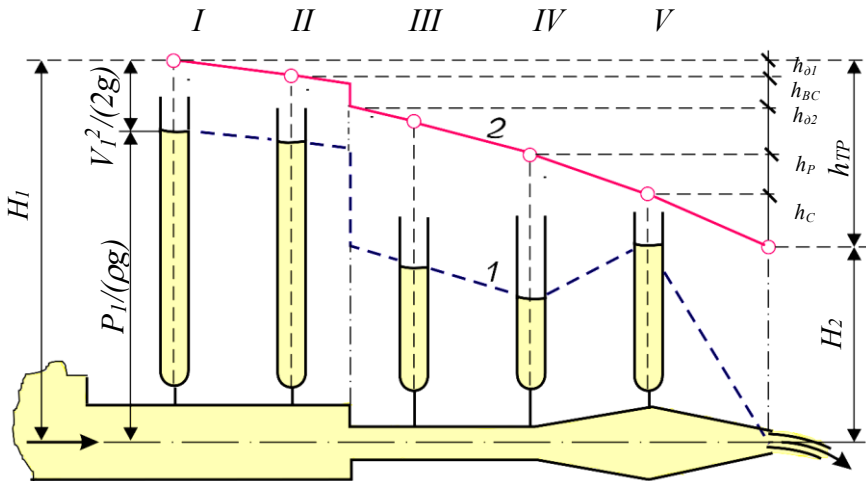


Abb. 6.2. Illustration der Bernulli Gleichung:

1, 2 – die piezometrische Kurve und die Druckkurve;  $H_1$ ,  $H_2$  – Gesamtdrücke (mechanische Energien) am Ein- und Ausgang des Kanals;  $h_{TP}$ ,  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $h_{BC}$ ,  $h_P$ ,  $h_C$  – Druckverluste: gesamte, nach der Länge am 1. und 2. Abschnitt, während der plötzlichen Verengung, der gleichmäßigen Erweiterungen und Verengungen.

# LABORARBEIT 7. DIE BESTIMMUNG DER LOKALEN ENERGIEVERLUSTE

**Das Arbeitsziel.** Die Bestimmung der Energieverluste Laufe eines Experimentes während der Überwindung der örtlichen Widerstände und der Vergleich dieser Verluste mit den nach den Ingenieurformeln berechneten Angaben.

## 7.1. Allgemeine Angaben

Die *lokalen Druckverluste* (Energieverluste) einer Flüssigkeit entstehen auf den kurzen Abschnitten der Rohrleitung mit den Hindernissen für die Strömung, die lokale Widerstände heißen (plötzliche Rohrerweiterung und -verengung, Ventile, Schieber, Klappen, Arme). An solchen Stellen entstehen die Zirkulationzonen, für die Flüssigkeitszirkulation in denen ein Teil der mechanischen Strömungsenergie aufgebraucht wird, die man lokale Druckverluste nennt. Die Größe der lokalen Energieverluste wird experimentell durch die Differenz der Gesamtenergien einer Flüssigkeit vor und nach dem lokalen Widerstand bestimmt.

In den Ingenieurberechnungen wird für die Bestimmung der lokalen Energieverluste die Formel  $h_M = \zeta V^2/(2g)$  benutzt, wobei  $\zeta$  der Koeffizient des lokalen Widerstandes (wird im Nachschlagewerk ausgewählt);  $V$  die Durchschnittsgeschwindigkeit der Strömung hinter dem lokalen Widerstand sind.

## 7.2. Versuchsdurchführung

1. Die Werte der Querschnittsflächen und der Geschwindigkeiten aus der Tabelle 6.1 in die Tabelle 7.1 übertragen.
2. Die Experimentalwerte der lokalen Verluste  $h_M$  ( $h_{BC}$ ,  $h_P$ ) nach dem Schaubild (Abb. 6.2) bestimmen.
3. Die Rechenwerte der lokalen Verluste bestimmen, sie mit den experimentellen Verlusten vergleichen und die Differenzen erklären.

Tabelle 7.1

№	Größen	Bezeichnungen, Formeln	Widerstandsart			
			Verengung		Erweiterung	
			1(II)	2(III)	1(IV)	2(V)
1	2	3	4	5	6	7
1.	Querschnittsflächen, $\text{cm}^2$	$\omega$				
2.	Durchschnittsgeschwindigkeit hinter dem Widerstand, $\text{cm/s}$	$V_2$				
3.	Experimentalwerteder lokalen Verluste, $\text{cm}$	$h_M (h_{BC}, h_p)$			-----	
4.	Koeffizienten der lokalen Widerstände	$\zeta_{BC}=0.5(1-\omega_2/\omega_1)$ $\zeta_{BP}=(\omega_2/\omega_1 - 1)^2$	-----			
5.	Rechenwerte der lokalen Verluste, $\text{cm}$	$h_M = \zeta V_2^2/(2g)$				

Anmerkung:  $\zeta_{BC}$ ,  $\zeta_{BP}$  – Koeffizienten für die plötzliche Verengung und Erweiterung.

## LABORARBEIT 8. DIE BESTIMMUNG DER ENERGIEVERLUSTE ÜBER DIE LÄNGE

**Das Arbeitsziel.** Die Beherrschung der experimentellen und berechneten Bestimmung der Energieverluste der Reibung über die Länge.

### 8.1. Allgemeine Angaben

Die *Energieverluste über die Länge* werden durch die bremssende Wirkung der Wandungen hervorgerufen, die zur zähflüssigen Reibung der Flüssigkeitsteilchen und –strahlen entlang der Rohrleitung führen. Sie werden nach der Formel berechnet:

$$h_{\partial} = \lambda (l / d) V^2 / (2g),$$

wobei  $\lambda$  - der Koeffizient der hydraulischen Reibung;  $l$ ,  $d$  – die Länge und die Weite des Rohrs (des Kanals);  $V$  – die Durchschnittsgeschwindigkeit sind. Die Energieverluste über die Länge werden im Laufe des Experimentes nach der Unterschiedlichkeit der Piezometeranzeigen bestimmt, die an Enden des experimentellen Kanalabschnitts befestigt sind, weil der Staudruck unveränderlich bleibt.

### 8.2. Versuchsdurchführung

1. Den Behälter 4 mit dem mit Wasser gefüllten Tank 1 auf den Tank 2 stellen (Abb. 6.1).
2. Die Werte der Piezometer  $I-V$  ablesen, die Zeit  $t$  der Wasserstandsänderung im Tank auf eine beliebig angegebene Größe  $S$  und die Temperatur  $T$  im Raum messen.
3. Nach den Anzeigen der Piezometer eine piezometrische Kurve zeichnen. Auf diesem Diagramm einen der gleichmäßigen Strömung entsprechenden Abschnitt mit konstanter Neigung (gewöhnlich Abschnitt  $III-V$ ) bestimmen. Seine Länge  $l$  und die *experimentelle* Verlustbedeutung  $h_{\partial}$  nach den Anzeigen der äußersten Piezometer an ihm bestimmen (Abb. 6.1).
4. Die Reynoldssche Zahl und *den Rechenwert* der Energieverluste  $h^*_{\partial}$  nach der in der Tabelle 8.1 angegebenen Reihenfolge,

und die relative Differenz des experimentellen und des Rechenwertes der Energieverluste berechnen. Diese Differenz erklären.

Tabelle 8.1

№	Größenbenennungen	Bezeichnungen, Formeln	Größenwerte
1	2	3	4
1.	Anzeigen der Piezometer, cm	$P_1/(\rho g), \dots, P_3/(\rho g)$	
2.	Die Länge des Abschnitts mit der gleichmäßigen Bewegung, cm	$l$	
3.	Der Experimentalwert der Energieverluste über die Länge, cm	$h_{\partial} = P_3/(\rho g) - P_1/(\rho g)$	
4.	Der kinematische Koeffizient der Wasserzähigkeit, $\text{cm}^2/\text{s}$	$\nu = 17.9/(1000+34T+0.22T^2)$	
5.	Die Reynoldssche Zahl	$Re = Vd/\nu$	
6.	Der Reibwert bei $Re < 2300$ $2300 < Re < 10d/\Delta$ $Re > 10d/\Delta$	$\lambda = 64/Re$ $\lambda = 0.316/Re^{0.25}$ $\lambda = 0.11(68/Re + \Delta/d)^{0.25}$	
7.	Der Rechenwert der Energieverluste über die Länge, cm	$h^*_{\partial} = \lambda(l/d) V^2/(2g)$	
8.	Die relative Differenz des Experimental- und des Rechenwertes der Verluste	$\delta_h = (h_{\partial} - h^*_{\partial})/h_{\partial}$	

$d = \dots \text{ cm}; \omega = \dots \text{ cm}^2; A = \dots \text{ cm}; B = \dots \text{ cm}; T = \dots \text{ }^{\circ}\text{C}; S = \dots \text{ cm};$   
 $t = \dots \text{ s}; Q = ABS/t = \dots \text{ cm}^3/\text{s}; V = Q/\omega = \dots \text{ cm/s}.$

Anmerkung. Die relative Rauheit der Kanalwände als  $\Delta = 0.001 \text{ mm}$  nehmen.