

С. Л. Деменок, В. В. Медведев, С. М. Сивуха

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ



ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

УДК 532.546:536.24

ББК 30.124:31.31

Д30

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор А. Н. Дядик,  
доктор технических наук, профессор Б. А. Тихомиров

**Д30 Деменок С. Л., Медведев В. В., Сивуха С. М.**  
Визуализация течения жидкости в каналах: монография.  
– СПб.: Страта, 2014. – 134 с.

ISBN 978-5-906150-14-1

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с применением результатов визуализации течений оптически активной жидкости в каналах теплообменных и технологических устройств и аппаратов. Приведены фотографии картин течения. Особое внимание уделено разработке моделей потенциального течения несжимаемой жидкости и их анализу на основе результатов визуализации потоков. На основании проведенных экспериментальных исследований и данных других авторов рассмотрены примеры использования результатов визуализации для профилирования стенок каналов различных аппаратов и устройств.

Предназначена для специалистов, занимающихся решением теоретических и прикладных задач по гидродинамике, тепло- и массообмену.

Ил. 64. Табл. 8. Библиогр.: 33 назв.

ISBN 978-5-906150-14-1

© С. Л. Деменок, 2014

© В. В. Медведев, 2014

© С. М. Сивуха, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ В НАСЫПНЫХ СБОРКАХ ... 5**

**Колос В. П.**, заместитель директора Института энергетики  
Национальной академии наук Беларуси, доктор физ.-мат. наук

Общие положения . . . . .	5
Торцевые эффекты. . . . .	8
Об устойчивости течения в каналах сборки. . . . .	11
Работа входного устройства монокассетного реактора. . . . .	12

## **ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION . . . . . 15**

### **ГЛАВА I.**

#### **Оптически активная жидкость.**

#### **Описание процесса визуализации . . . . . 19**

1.1. История вопроса. . . . .	19
1.2. Выбор оптически активной жидкости . . . . .	22
1.3. Свойства водного раствора пентаоксида ванадия. . . . .	24
1.4. Методика исследования картины движения жидкости. . . . .	25
1.5. Описание стенда по визуализации потоков и принцип его работы . . . . .	30
1.6. Примеры визуализации потоков . . . . .	35

### **ГЛАВА II.**

#### **Примеры использования модели потенциального**

#### **течения несжимаемой жидкости . . . . . 45**

2.1. Течение в диффузорах, конфузорах и каналах с волнообразными стенками. . . . .	45
2.1.1. Исходные уравнения и их решения. . . . .	45

2.1.2. Плоский потенциальный поток в канале с волнообразными стенками . . . . .	48
2.1.3. Осесимметричный потенциальный поток в канале с волнообразными стенками . . . . .	54
2.1.4. Плоский и осесимметричный потоки в канале с монотонно расходящимися и сходящимися границами . . . . .	59
2.1.5. Плоский и осесимметричный потоки в каналах с заданным распределением скоростей в их входных сечениях	65
2.1.6. Связь между характеристиками плоского и осесимметричного каналов . . . . .	69
2.2. Течение потока охлаждающего воздуха в носовой части дефлекторной лопатки . . . . .	70
2.2.1. Постановка задачи . . . . .	70
2.2.2. Наложение прямолинейно-поступательного потока на плоский источник . . . . .	72
2.2.3. Рекомендации по конструированию носка дефлектора . . . . .	79
2.3. Течение пристенной струи, вытекающей в ограниченное пространство . . . . .	84
2.3.1. Постановка задачи . . . . .	84
2.3.2. Расчет границы плоской струи, вытекающей в ограниченное пространство . . . . .	86

## **ГЛАВА III.**

### **Примеры использования результатов визуализации**

#### **течений в каналах . . . . . 101**

3.1. Обтекание шаров и шаровых укладок в каналах . . . . .	101
3.2. Профилирование тройников и отводов . . . . .	105
3.3. Профилирование каналов первичных преобразователей расхода . . . . .	113
3.4. Профилирование подводящих и отводящих каналов . . . . .	117

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ / AFTERWORD . . . . . 123**

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . . 125**

## ГЛАВА I.

# ОПТИЧЕСКИ АКТИВНАЯ ЖИДКОСТЬ. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВИЗУАЛИЗАЦИИ

### 1.1. История вопроса

Впервые двойное лучепреломление (ДЛП) наблюдал Максвелл в 1866 г. при ламинарном движении канадского бальзама между скрещенным поляризатором и анализатором [2]. Им было высказано предположение, что ДЛП вызывается чистым сдвигом, когда оба главных нормальных напряжения равны по величине и противоположны по знаку. По мере появления новых опытных данных по результатам исследований в поляризованном свете движущихся потоков теория ДЛП получает дальнейшее развитие.

Сравнительно подробный обзор работ в области исследования ДЛП и его применения для решения практических задач содержится в работе А. Д. Михайлова [3], который на основе опытных данных пришел к выводу, что ДЛП жидкостей, состоящих из палочкообразных частиц, вызывается как напряжением вдоль линий скольжения (по Максвеллу), так и ориентацией частиц в направлении движения потока, и предложил методику построения скоростей по наблюдаемой изохроматической картине. Он проводил исследования с помощью коллоидного

раствора пятиоксида ванадия, который привлек пристальное внимание исследователей в связи с высокой оптической активностью.

Первые попытки использовать явление ДЛП для исследования условий течения потока относятся к началу прошлого века. Так, в 1905 г. В. А. Бернадский [4] изучал двойное преломление прованского масла под давлением 0,15—0,3 МПа в канале прямоугольного сечения, ось которого была перпендикулярна плоскополяризованному лучу света. Результаты своих опытов автор объяснил теорией Максвелла о действии на каждую частицу движущейся жидкости чистого сдвига. Опыты В. А. Бернадского с прованским маслом повторил позднее А. Д. Михайлов [3], используя вместо плоского поляризованного луча поляризованный по кругу луч. Кроме прованского масла он использовал коллоидный раствор пятиоксида ванадия 5%-ной концентрации для изучения движения жидкости при обтекании цилиндрического тела плоским потоком. Цилиндр представлял собой стеклянный диск диаметром 3,8 мм, помещенный в плоский канал. Слой жидкости был равен 1,5 мм и набегал на цилиндр со скоростью 10,8 см/с. А. Д. Михайлов подтвердил возможность применения поляризационно-оптического метода в условиях плоского потока для построения не только качественной, но и количественной картины распределения скоростей в ламинарном потоке, для установления места отрыва струй при обтекании тела любой плоской конфигурации, при отыскании рациональной формы обтекания тела.

По поводу использования явления ДЛП в исследованиях турбулентных потоков А. Д. Михайлов ошибочно полагал, что эффект ДЛП будет неопределенным и может изменяться от нуля до максимума без всякой связи со скоростным градиентом, так как при турбулентном движении по пути проходящего луча ориентация частиц нерегулярна, и поляризационный свет пересечет частицы жидкости, ориентированные различным образом.

Я. В. Мамуль [5] применил в качестве ОАЖ старые золи пятиокиси ванадия, обладающие большим ДЛП при течении. Эксперименты проводились в условиях ламинарного режима течения для простейших случаев обтекания, для которых распределение скоростей известно из теории, а именно для случая обтекания цилиндра и гиперболического потока. Размеры плоскопараллельной части сосуда с цилиндром  $45 \times 150$  мм, расстояние между стенками 10 мм, диаметр цилиндра 7 мм. Скорость течения ОАЖ не превышала 2 см/с. Сосуд для получения гиперболического потока был изготовлен из металлической пластины размером  $200 \times 200 \times 10$  мм с вырезанным внутри ее профилем прямого угла, ограниченного кривой в форме гиперболы. Металлические поверхности, контактирующие с раствором пятиокиси ванадия, парафинировались, а рамка целиком зажималась между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками. Следует отметить, что Я. В. Мамуль исследовал отдельные стадии возникновения турбулентности и предложил методику определения особых или изотропных точек потока, где градиент скорости равен нулю или бесконечно мал, в условиях круговой поляризации.

После Я. В. Мамуля коллоидный раствор пятиокиси ванадия с концентрацией 0,01—0,1% для получения распределения градиентов скоростей при истечении через водослив, а также при обтекании модели крыла в канале шириной 3 мм применил М. М. Вятских [6], предполагая при этом, что гидромеханические свойства раствора не отличаются от свойств чистой жидкости. Вятских определил большой круг практических задач, при решении которых может быть полезным применение оптического метода: 1) изучение распределения градиентов скоростей в условиях ламинарного течения жидкостей; 2) частичное исследование структуры турбулентного потока и отделение его от ламинарного потока (например, у стенки); 3) исследование картины обтекания тел различной конфигурации с целью определения рациональной формы; 4) изучение картины распределения динамических усилий потока на конструкции затворов

и сооружений; 5) исследование картины динамических напряжений в жидкости при вибрации и движении твердых тел в ее среде, а также при неустановившемся движении жидкости; 6) наблюдение за рядом физических процессов в жидкости, так или иначе влияющих на структуру последней. М. М. Вятских, как и Я. В. Мамуль, ограничивает получение этим методом только качественных результатов, считая, что в ряде случаев для прикладных целей этого уже достаточно.

Количественные характеристики визуализированного с помощью ДЛП течения смог получить Ю. М. Бычков [7] на основе специально разработанной методики определения турбулентных характеристик потоков.

## 1.2. Выбор оптически активной жидкости

Поляризационно-оптический метод основан на использовании некоторых оптически активных прозрачных жидкостей, являющихся оптически изотропными в состоянии покоя и проявляющих в движении свойство двойного лучепреломления, визуализируемого с помощью поляризованного света.

Все ОАЖ для гидродинамических исследований должны быть достаточно прозрачными, обладать необходимой оптической чувствительностью, четко выраженной зависимостью между оптическими и механическими величинами, которую можно устанавливать экспериментально в ходе тарировочных испытаний. Оптико-механические свойства ОАЖ должны отвечать условиям моделирования, для чего необходимо иметь в большом выборе чистые жидкости с различными оптико-механическими свойствами или растворы ОАЖ, концентрацию которых можно менять в зависимости от условий моделирования. В зависимости от условий проведения эксперимента ОАЖ должны удовлетворять и некоторым другим требованиям. Например, если исследования проводятся при комнатной температуре, оптико-механические свойства ОАЖ

должны быть стабильными в пределах возможных отклонений от средней комнатной температуры. Когда эксперимент тянется продолжительное время, то оптико-механические свойства ОАЖ должны быть также стабильны во времени. Кроме того, необходимо учитывать технологию приготовления и недефицитность материалов. В работе [7] приведена классификация ОАЖ по назначению и оптико-механическим свойствам, согласно которой все ОАЖ можно разделить по следующим признакам:

— по назначению в прикладной гидромеханике ОАЖ могут использоваться для исследования потоков, в которых эффекты вязкости велики или настолько незначительны, что ими можно пренебречь;

— по механическим свойствам все ОАЖ можно разделить на сильновязкие и маловязкие. Сильновязкие ОАЖ имеют вязкость больше 1 пуаза, маловязкие — до 1 пуаза;

— по химическому признаку среди ОАЖ можно выделить низкомолекулярные жидкости, суспензии, состоящие из жестких частиц, и растворы, содержащие линейные молекулы. К низкомолекулярным ОАЖ относятся бензол, нитробензол, толуол и некоторые спирты. К суспензиям, содержащим жесткие частицы, можно отнести коллоидные системы вируса табачной мозаики, золя пентаоксида ванадия, суспензии коагулянта бентонитовых глин и др. К высокомолекулярным ОАЖ могут быть отнесены полистерен в стиреновом мономере, раствор целлюлозы в этиленгликольметилом ацетате, диметилфталатцеллюлозный эфир и др.;

— по оптической чувствительности ОАЖ можно разделить условно на слабо оптически активные и сильно оптически активные. К слабо оптически активным могут быть отнесены жидкости, не дающие в движущемся потоке визуально наблюдаемой оптической картины. К сильно оптически активным жидкостям могут быть отнесены жидкости, обладающие значительным двойным лучепреломлением и обеспечивающие четкую картину течения при их использовании для визуализации

движения жидкости. К таким ОАЖ наряду с пятиокисью ванадия относятся коагулянты бентонитовых глин;

— по технологии приготовления ОАЖ можно разделить на чистые жидкости и растворы (коллоидные, полимерные, синтетические красители).

К ОАЖ, применяемым для визуализации потоков, предъявляются следующие требования: они должны обладать выраженным эффектом ДЛП, достаточной прозрачностью, ньютоновским поведением, агрегатной устойчивостью при контакте с конструкционными материалами, нетоксичностью. Наиболее полно отвечает перечисленным требованиям водный раствор пятиокиси ванадия.

### 1.3. Свойства водного раствора пентаоксида ванадия

Пентаксид ванадия образует коллоидный водный раствор (золь). Вязкость золя с рабочей концентрацией 0,05—0,06% отличается от вязкости воды не более чем на 5%. Водные золи пентаоксида ванадия обнаруживают хорошие оптические свойства при малых изменениях скорости потока, устойчивы к изменениям температуры, прозрачны в красной области спектра.

Основным недостатком зольей пентаоксида ванадия является их недостаточная агрегатная устойчивость по отношению к электролитам: кислотам, щелочам, солям. Это требует применения специальных материалов для изготовления емкостей и деталей, имеющих непосредственный контакт с ОАЖ, а также специальной технологии промывки и заливки исследуемых проточных систем. В частности, недопустимы металлические детали, так как в результате их коррозии образуются ионы металлов, являющиеся коагулянтами.

Было установлено [8], что оптические свойства пятиокиси ванадия изменяются во времени. У свежеприготовленных растворов ДЛП мало и увеличивается в зависимости от времени хранения раствора, достигая максимальной величины

при комнатной температуре в течение шести месяцев. По данным [9], [10] оптическая активность пятиокси ванадия в первые недели растет по закону прямой линии, а через некоторое время эта прямая изгибается и на увеличение оптической активности оказывает влияние концентрация раствора. После разбавления концентрированного раствора коэффициент оптической активности сначала снижается, а затем начинает расти, достигая некоторого постоянного значения.

### 1.4. Методика исследования картины движения жидкости

Коллоидный раствор пятиокси ванадия, применяющийся в качестве рабочей жидкости, является устойчивым только в условиях его контакта с химически инертными материалами, к числу которых относятся, например, пластмассы, стекло, резина.

Материалы моделей, помимо химической инертности по отношению к раствору пятиокси ванадия, должны быть прозрачными для прохождения через них поляризованного света и оптически неактивными. Для того, чтобы модели не искажали картину течения, оптическая анизотропия прозрачных материалов моделей должна быть малой по сравнению с ДЛП потока ОАЖ.

Часто исследование пространственного потока заменяется исследованием плоских потоков, что упрощает как теоретические, так и экспериментальные исследования. Кроме того, экспериментальная реализация поляризационно-оптического метода еще более упрощается, если плоские модели являются прямолинейными и плоскость их просвечивания располагается перпендикулярно направлению поляризованного света.

В поляризационно-оптическом методе важным является выбор толщины плоской модели проточной части. По Л. И. Седову [11], движение сплошной среды называется плоскопараллельным, если можно выбрать декартову систему координат

$x$ ,  $y$  и  $z$  так, чтобы скорости всех частиц среды оказались параллельными плоскости  $(x, y)$ , причем все характеристики движения и состояния представили бы собой функции только двух координат  $x$ ,  $y$  и, может быть, времени  $t$ . Таким образом, в плоском потоке поля характеризующих его физических переменных величин, например, скоростей и давлений, не зависят от одной из координат.

Условия течения пространственных потоков во многом определяются твердыми стенками канала. В силу явления прилипания жидкости к ней, стенка оказывает тормозящее воздействие на поток и определяет характер распределения скоростей по рассматриваемому сечению потока.

Следовательно, получение теоретически плоского потока, движущегося между стенками, физически невозможно, так как нельзя исключить влияние стенок на характеристики движения. В этом случае Ю. М. Бычков [12], [13] вводит понятие экспериментально-плоского потока, который должен удовлетворять следующим двум требованиям:

- 1) при наличии стенок влияние их на характеристики движения должно быть минимально возможным;
- 2) характеристики движения и состояние плоского потока не должны зависеть от одной из координат, например,  $z$ , а траектории движения всех частиц потока должны быть параллельны плоскости  $(x, y)$ .

Качественное понятие экспериментального плоского потока можно иметь на основе представлений о структуре турбулентного потока, управляемого стенкой. Если в натурном потоке имеет место ламинарный пограничный слой, то в нем тормозящее действие оказывают силы вязкости. В переходной области происходит развитие турбулентности и скорости возрастают до конечного основного значения. Очевидно, что линия, определяющая переходную область от основного течения, является границей, за которой не сказывается влияние стенки на характер течения жидкости в нем. Следовательно, существование пограничного слоя и переходной области определяется наличием

стенки, а их толщина, с одной стороны, — шероховатостью, с другой — числом Рейнольдса внешнего течения. Отсюда вытекает, что при данных условиях течения в толщину экспериментального плоского потока неизбежно должны входить: толщина пограничного слоя, толщина слоя жидкости в переходной области и толщина теоретического плоского потока, т. е.

$$\delta_{\text{ЭПП}} = 2\delta_{\text{ПС}} + 2\delta_{\text{ПО}} + \delta_{\text{ТПП}}, \quad (1.1)$$

где  $\delta_{\text{ПС}}$  — толщина пограничного слоя;  $\delta_{\text{ПО}}$  — толщина переходной области;  $\delta_{\text{ТПП}}$  — толщина теоретического плоского потока.

Толщина ламинарного пограничного слоя  $\delta_{\text{ПС}}$  при безотрывном течении вдоль пластины (наиболее распространенный случай при моделировании) может быть ориентировочно определена по формуле:

$$\frac{\delta_{\text{ПС}}}{l} \approx \frac{5}{\sqrt{Re}}. \quad (1.2)$$

Здесь  $l$  — длина пластины;  $Re$  — число Рейнольдса для длинной пластины.

Эта зависимость получена из условия, что толщина пограничного слоя распространяется на расстояние от стенки, при котором скорость течения в пограничном слое на 1% отличается от скорости внешнего течения. Следовательно, в переходной области должно произойти незначительное выравнивание скоростей до значений, равных 0,99—1,0, и это дает основание пренебречь толщиной переходной области.

Толщина теоретического плоского потока  $\delta_{\text{ТПП}}$  должна быть выбрана так, чтобы скорость течения в нем соответствовала скорости течения в объемном потоке. Ю. М. Бычков дает следующую рекомендацию [12] для определения толщины теоретического плоского потока. Эта толщина должна быть равна минимальной ширине данной трубки тока, определяемой по движению оптического пятна [13].

Из (1.2) следует, что толщина пограничного слоя увеличивается с увеличением длины пластины и с уменьшением числа Рейнольдса. Кроме того, известно также, что масштаб турбулентности увеличивается с понижением скорости. Отсюда вытекает вывод, что плоская модель проточной части местного сопротивления должна иметь переменную толщину, что создаст огромные экспериментальные трудности, преодолеть которые в плоских моделях сложной геометрии не представляется возможным.

Ю. М. Бычков предлагает приблизительно обойти это положение следующим образом: толщина плоской модели принимается постоянной и является максимальной толщиной экспериментального плоского потока, соответствующей минимальной скорости. Как правило, такие участки должны находиться в подводящих каналах на входе и выходе в местное сопротивление. Извлечение же экспериментальной информации должно производиться из объема, расположенного в теоретическом потоке и соизмеримого с масштабом турбулентности.

В методе скоростной фотографической регистрации это условие выполняется наведением объектива на резкость этого объекта, а в методе фотографической регистрации — фокусированием луча света на этот объем.

Условие подобия для плоской модели может быть установлено из следующих соображений. Число Рейнольдса для трубки тока равно:

$$Re_{\text{ТР}} = \frac{V_{\text{max}} \delta_{\text{ТПП}}}{v_{\text{вода}}}. \quad (1.3)$$

Число Рейнольдса для плоской модели, выполненной по данной трубке тока:

$$Re_{\text{М}} = \frac{V_{\text{ЭПП}} \delta_{\text{ЭПП}}}{v_{\text{ОАЖ}}}. \quad (1.4)$$

Здесь  $V_{\text{max}}$  — максимальная скорость течения по оси потока в коллекторной системе в слое жидкости, равном толщине те-

#### 1.4. Методика исследования картины движения жидкости

оретического плоского потока;  $V_{\text{ЭПП}}$  — скорость экспериментального плоского потока в модели, являющаяся средней расходной скоростью;  $\delta_{\text{ТПП}}$  — толщина теоретического плоского потока;  $\delta_{\text{ЭПП}}$  — толщина экспериментального плоского потока.

Очевидно, что условие подобия по числам Рейнольдса будет иметь место, когда

$$\frac{v_{\text{ОАЖ}} V_{\text{max}}}{v_{\text{вода}} V_{\text{ЭПП}}} = \frac{\delta_{\text{ЭПП}}}{\delta_{\text{ТПП}}}. \quad (1.5)$$

Ясно, что это условие выполняется автоматически, если напор в модели и натуральном образце, обеспечивающий установившийся режим течения, одинаков. Кроме того, ориентация вектора скорости жидкости относительно выбранной системы координат, связанной с твердой стенкой, в плоскости осевой симметрии натурального образца и модели, изготовленной в натуральную величину, будет одинаковой. Следовательно, подобие условий течения в плоской модели и в осесимметричном натурном образце, а также по одной и той же трубке тока будет обеспечиваться одинаковым напором на входе при установившемся режиме течения.

Основой методики определения рациональной формы проточной части является принцип замещения, сформулированный Ю. М. Бычковым [12], [13], который можно проиллюстрировать следующим образом.

При существовании отрывных течений образуются в основном две области, а именно:

- область транзитного потока, где линии тока не пересекаются и идут в среднем в одном направлении;
- область водоворотных зон, где происходит образование больших и малых вихрей, их возникновение и разрушение.

При установившемся движении жидкости эти области разделены плоскостями, где существуют условия отсутствия градиента скоростей между ними, они называются плоскостями «нулевого сопротивления».

Обнаружив положение плоскости «нулевого сопротивления» с помощью визуализации, можно область водоворотной зоны заполнить (заместить) твердой фазой, т. е. исключить затраты удельной механической энергии на образование этой области в потоке, таким образом сохранив часть удельной механической энергии, затрачиваемой на гидравлические сопротивления, т. е. создав условия гидравлической оптимальности движения.

Существование твердой стенки, по форме совпадающей с формой плоскости «нулевого сопротивления», не дает полной оптимизации, так как существует при этом условие  $t > 0$ , но затраты удельной механической энергии в безотрывном потоке будут меньше, чем в отрывном.

## 1.5. Описание стенда по визуализации потоков и принцип его работы

Стенд по визуализации потоков состоит из трех основных частей:

- гидравлической (рис. 1.1);
- механической (рис. 1.1);
- оптической (рис. 1.2).

**Гидравлическая часть.** Гидравлическая часть стенда предназначена для создания направленного течения ОАЖ и состоит из двух емкостей, соединенных трубками с рабочим участком стенда и вакуум-насосом. Емкости выполнены в виде баков 1 и 2, изготовленных из оргстекла, на каждом из них имеется шкала 25, предназначенная для измерения расхода жидкости. На крышках баков расположены распределительные устройства 14, обеспечивающие соединение воздушных полостей баков посредством шлангов 16 с вакуум-насосом 15 и через клапаны 12 и 13 — с атмосферой. На передних стенках баков размещены крышки 24, предназначенные для облегчения до-

## 1.5. Описание стенда по визуализации потоков и принципа его работы

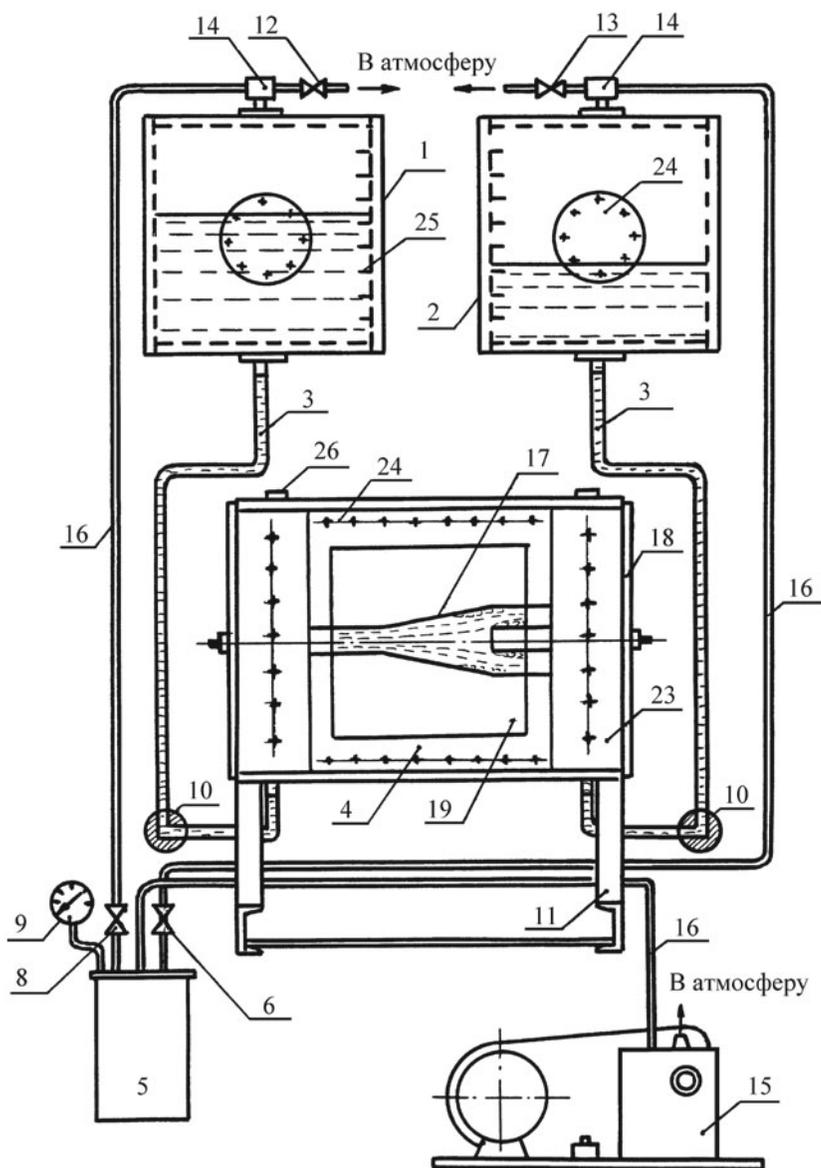


Рис. 1.1. Стенд по визуализации потоков, гидравлическая и механическая части

ступа к внутренним поверхностям при мытье баков. Для реверсирования потока установлен ресивер 5 с клапанами 6 и 8.

Контроль за величиной вакуума в ресивере 5 осуществляется при помощи мановакуумметра 9. В днищах баков 1 и 2 выполнены отверстия, соединенные виниловыми трубками 3 с рабочим участком стенда. Последний представляет собой плоскую модель 17 исследуемого элемента проточной части, размещенную между листами экрана 4. Для перекрытия течения ОАЖ установлены краны 10.

**Механическая часть стенда.** Механическая часть стенда предназначена для крепления основных элементов и состоит из станины II с поворотной рамой 23 и стоек для установки баков 1 и 2.

**Оптическая часть стенда.** Оптическая часть стенда предназначена для непосредственной визуализации потоков на основе эффекта двойного лучепреломления в поляризованном свете и состоит из мощного источника света 20, полярироидов 19 и 21, скрещенных «на темноту», и фоторегистрирующего прибора 22. Для лучшего качества фоторегистрации рекомендуется модель 17 выполнять из непрозрачного материала.

**Принцип работы.** Движение ОАЖ в гидравлической части стенда происходит за счет создания в баках 1 и 2 перепада давления. Это осуществляется следующим образом. При помощи вакуум-насоса 15 в ресивере 5 создается разрежение, контролируемое мановакуумметром 9. Открывая один из клапанов,

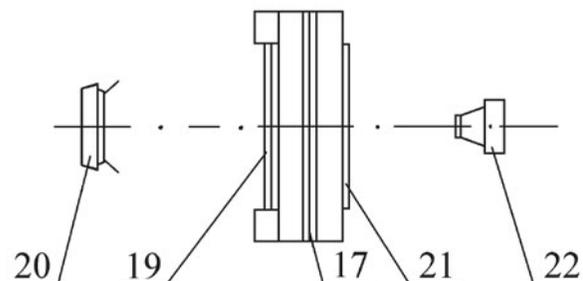


Рис. 1.2. Стенд по визуализации потоков, оптическая часть

## 1.5. Описание стенда по визуализации потоков и принципа его работы

например, клапан 8, и, соответственно, перекрывая клапан 6, при закрытом клапане 12 в воздушной емкости бака 1 создается разрежение. Для обеспечения течения ОАЖ открываются клапан 13, сообщающий воздушную емкость бака 2 с атмосферой, и краны 10.

Мощный источник света 20 (1 кВт) создает естественный свет, который, проходя через поляроид-поляризатор 21, поляризуется. При прохождении поляризованного света через ОАЖ плоскость поляризации в каждой точке в зависимости от вектора скорости потока поворачивается на определенный угол. При дальнейшем прохождении света через поляроид-анализатор 19, скрещенный с поляроидом-поляризатором «на темноту», на экране 4 можно наблюдать различные линии равной освещенности, которые и являются линиями тока. Картина течения при этом может регистрироваться как при помощи фотоаппарата 22, так и с помощью скоростной кинокамеры. При необходимости реверсирования потока клапаны открываются и перекрываются наоборот (клапаны 8 и 13 — закрыты, а 6 и 12 — открыты).

Для исключения влияния сил тяжести на картину течения экран 4 можно при помощи поворотной рамы 23 повернуть в горизонтальную плоскость.

Следует отметить, что описанная выше установка может быть дополнена трактом измерения гидродинамических характеристик лазерным доплеровским анемометром (ЛДА) [14]. В этом случае появляется возможность получать не только качественную картину течения, но и количественные характеристики потока.

Модернизированная установка (рис. 1.3) содержит модель реального объекта 1, выполненную из оргстекла, с патрубками подвода 2 и отвода 3 оптически активной жидкости, насоса 4, обеспечивающего циркуляцию этой жидкости, источник поляризованного света 5 и ЛДА 6.

При работе установки через модель прокачивается оптически активная жидкость, коллоидные частицы которой в поляризованном свете становятся видимыми и их перемещение

визуализирует картину течения в тракте модели, определяют характерные зоны течения, устанавливают их форму, размеры, границы, намечают точки траверсирования потока и с помощью ЛДА зондируют поперечное сечение канала. На основе полученной информации оптимизируют проточную часть.

Разработанная установка отличается от существующих визуализационных стендов компактностью, четкостью линий тока жидкости, возможностью получения качественных фотографий исследуемых объектов. При этом, благодаря отсутствию трэковых примесей, исключается искажение картины течения потока. Одновременные наблюдения картины течения и измерение гидродинамических характеристик позволяют исследовать и нестационарные потоки, например, в камерах сгорания, смесителях и т.п. Кроме того, за счет визуального определения характерных зон течения, повышается информативность и уменьшается объем замеров ЛДА. Все это снижает стоимость и продолжительность оптимизации проточных частей.

Внедрение стенда позволило обеспечить рациональное профилирование рабочего тракта турбомашин, камер сгорания,

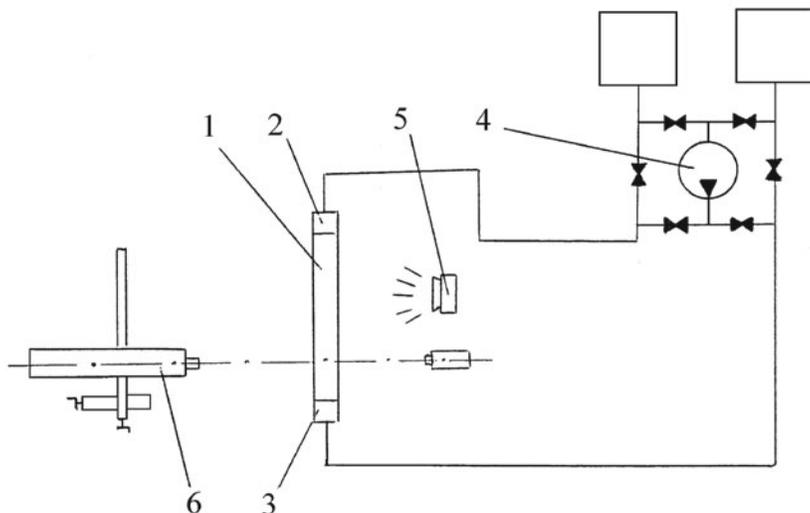


Рис. 1.3. Установка для оптимизации проточных частей элементов энергетического оборудования

теплообменников и иных устройств, работа которых зависит от движения жидкости.

### 1.6. Примеры визуализации потоков

В монографии представлены фотографии результатов визуализации потоков в различных каналах технических устройств выполненные авторами (рис. 1.4—1.15), а также предоставленные Л. А. Федосеевым.

Исследованные режимы течений охватывают, обыкновенно, ламинарную, переходную и развитую турбулентную области. Наблюдение и анализ картин течений, помимо эстетической привлекательности, имеет и сугубо практический смысл.

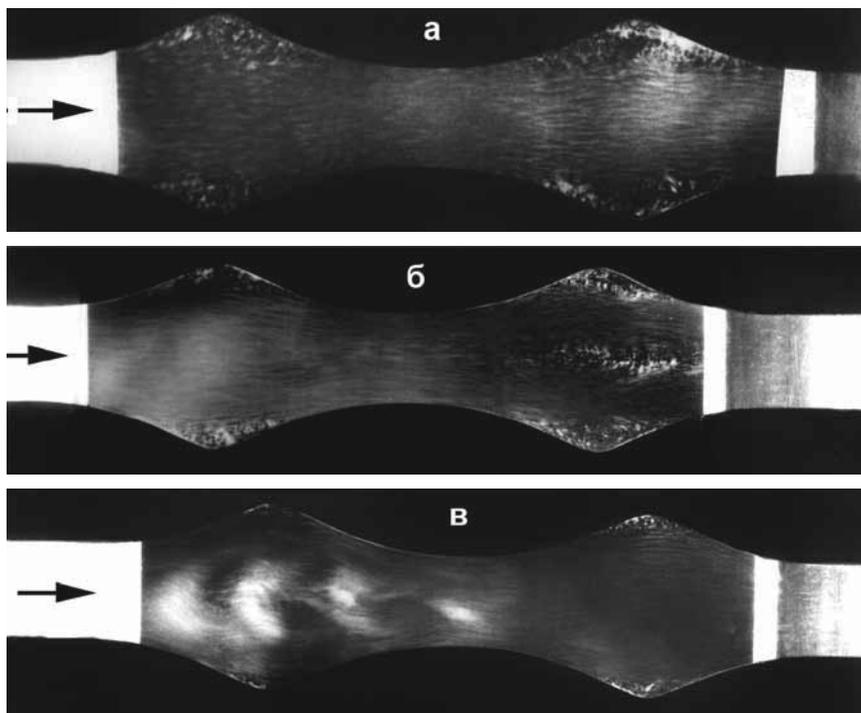


Рис. 1.4. Течение в канале с волнообразными стенками: а, б, в – варианты режимов течения с последовательным уменьшением расхода