

К ВОПРОСУ О ГРАНИЦАХ АТОМОДЕЛЬНОСТИ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ

А. А. Гухман, В. С. Жуковский и В. Н. Тарасова

§ 1. Общие соображения

Испытание рабочих элементов паровых турбин в условиях нормального режима представляет большие технические трудности. Наличие вращательного движения, весьма малые размеры некоторых элементов (лопатки первых ступеней), высокое давление и высокая температура пара — все это создает обстановку, которая в условиях опыта практически не может быть реализована. Поэтому обычно при испытаниях условия существенно упрощают.

Исследуется неподвижная система, выполненная в увеличенном масштабе. Для продувки применяется холодный воздух. Кроме того, весьма часто продувка ведется при значительно пониженной, по сравнению с нормальной, скорости потока.

Если оставить в стороне подлежащий особому рассмотрению вопрос о влиянии вращательного движения, то надо отметить, что все остальные упрощения в своей совокупности означают замещение действительного объекта исследования иным, который следовательно рассматривается как его модель.

Однако, соотношение между образцом и моделью вовсе не исчерпывается тем, что вторая система является геометрической моделью первой. Замещение какого-либо объекта исследования другим возможно только при условии, если заранее существует уверенность в том, что эти объекты подобны, т. е. что все явления, в них происходящие, качественно совершенно тождественны и количественно характеризуются величинами, связанными простыми, также заранее известными, соотношениями.

В теории подобия устанавливаются те предпосылки, соблюдение которых гарантирует осуществление подобия явлений. В числе такого рода предпосылок содержатся определенные требования относительно связи между размерами, скоростью движения и физическими константами жидкости в образце и модели. Эти требования ни в какой мере не учитываются при испытаниях рабочих элементов турбин. Однако было бы неправильно думать, что этим рассматриваемый метод испытаний полностью обесценивается.

В теории подобия показывается, что в известных условиях подобие имеет место вне зависимости от соблюдения каких-либо количественных ограничений. Для характеристики специфического значения этих условий отвечающие им области называются автомодельными. Таким образом, теоретическое содержание задачи о закономерности рассматриваемого метода испытания элементов турбин

заключается в исследовании вопроса о принадлежности обоих явлений — исследуемого и действительного — к одной и той же автомодельной области.

Решение этого вопроса на основании обычных представлений гидродинамики невозможно. Специфические затруднения, возникающие при изучении явлений движения при весьма больших скоростях потока, заключается в том, что в этих условиях жидкость нельзя более рассматривать как объемноустойчивую среду. Плотность реальной жидкости может быть в пределах поля течения принята в качестве постоянной только до тех пор, пока действующий напор остается незначительным. Если градиенты давления велики, то изменения плотности перестают быть пренебрежимо малыми. Для получения высоких скоростей необходимы, при прочих равных условиях, большие градиенты давления. Поэтому с увеличением скоростей потока возникает тенденция к проявлению сжимаемости, игнорируемой в гидродинамике.

Качественные особенности рассматриваемой категории явлений становятся заметными с особенной резкостью, когда скорости в поле течения достигают скорости распространения упругих деформаций, т. е. скорости звука. В этих условиях кризисным образом возникают местные явления, совершенно неизвестные обычной гидродинамике: поток пронизывается стоячими волнами, появляются уплотняющие удары и тому подобные признаки, которые свидетельствуют о возникновении эффектов, граничащих с нарушением физической непрерывности поля. Поэтому самые основные принципы гидродинамического анализа нуждаются здесь в соответствующем видоизменении.

Учение о движении жидкости при скоростях столь значительных, что в ней возникают непренебрежимые изменения плотности, называется газодинамикой.

В настоящее время газодинамика позволяет разрешить аналитическим путем лишь очень малое количество конкретных задач. В частности, вопрос о границах автомодельности при течении по криволинейным каналам, каковыми являются, например, лопатки турбин, еще совершенно не разрешен и даже не освещен экспериментальными исследованиями.

§ 2. Теория вопроса

Газодинамические явления — как объект приложения теории подобия — отличаются следующими особенностями:

1. Движение газа совершается с весьма высокими скоростями и соответственно характеризуется большими значениями критерия Re .
2. Движение газа сопровождается изменением плотности вследствие изменения его давления.

Первая из этих особенностей, согласно выводам общей теории подобия,¹ приводит к заключению о независимости условий процесса от критерия Re .

Действительно весьма большим значениям критерия Re отвечает „инерционный режим“, при котором силы внутреннего трения пренебрежимо малы по сравнению с инерционными силами. Вследствие этого величина Re , представляющая собой меру отношения сил обеих

¹ М. В. Кирпичев и А. А. Гухман. Теория подобия. „Труды Гос. Физико-Технической Лаборатории“. Вып. 9. Москва, 1929 г.

категорий, теряет смысл определяющего критерия. Для обычных гидродинамических процессов равенство значений критерия Re есть единственное ограничительное количественное требование, которому должны удовлетворять подобные между собой явления. Поэтому инерционный режим получает смысл автомодельной области, т. е. области, в пределах которой все явления с подобными условиями однозначности друг другу подобны. Этот вывод однако не может быть распространен на явления газодинамические, так как обстановка усложнена второй их основной особенностью — сжимаемостью среды.

При изучении явлений, происходящих в упругой объемнодеформируемой жидкости, в круг рассмотрения входит еще одно уравнение, устанавливающее связь между изменением плотности и изменением давления. Таким уравнением является выражение для скорости распространения деформации в среде:

$$a = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}}, \quad (1)$$

где a — скорость распространения деформации (скорость распространения звука) в исследуемой среде при давлении p и плотности ρ .

Обработка этого уравнения методами общей теории подобия¹ приводит к следующему требованию:

$$\frac{\Delta p}{\rho a^2} = \text{idem}, \quad (2)$$

которое является дополнительным к обычной системе условий, отвечающей уравнениям гидродинамики:

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} = \text{idem}, \quad (3)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} = \text{idem}. \quad (4)$$

При сопоставлении уравнений (2) и (4) непосредственно обнаруживается глубокое их сходство — новый критерий в уравнении (2) отличается от критерия Eu только тем, что в состав его вместо действительной скорости движения жидкости входит скорость распространения звука в ней. Комбинируя оба критерия, можно очевидно прийти к некоторому новому критерию, не содержащему перепада давления. Действительно из уравнений (2) и (4) имеем:

$$\left. \begin{array}{l} \text{или} \\ \frac{\rho w^2}{\rho a^2} = \text{idem} \\ \frac{w}{a} = \text{idem}. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Этому критерию присвоено специальное обозначение:

$$\frac{w}{a} = Ba. \quad (6)$$

Таким образом дополнительное условие, возникающее из рассмотрения зависимости между изменениями плотности и давления, заключается в требовании равенства отношения скорости движения жидко-

¹ М. В. Кирпичев и А. А. Гухман, цитированная статья, стр. 13.

сти к скорости распространения звука в ней. Критерии Va можно привести к несколько иной форме, в которой с большей отчетливостью отражается его физический смысл как количественного признака, характеризующего сжимаемость среды.

Выражение для скорости звука может быть представлено в виде:

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (7)$$

где E — модуль Юнга. Решая это уравнение относительно E , имеем

$$E = \rho a^2 \quad (8)$$

Отсюда следует, что знаменатель правой части уравнения (5) есть модуль Юнга. Поэтому

$$Va = \frac{\rho \omega^2}{E}. \quad (9)$$

Таким образом критерий Va есть отношение динамического напора, вызывающего объемную деформацию, к модулю Юнга.

Критерий Va принадлежит к категории определяющих, так как в состав его помимо физических констант среды входит только скорость. Некоторые дальнейшие выводы, относящиеся к практически наиболее интересным случаям движения газа и пара, легко получаются, если принять во внимание, что распространение деформации в упругой среде с весьма высокой степенью точности может рассматриваться как процесс адиабатический.

Адиабатическое изменение состояния с достаточным приближением определяется уравнением:

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const}, \quad (10)$$

где показатель адиабаты k в случае газа имеет простой физический смысл отношения теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме, а в случае пара представляет собой эмпирическую константу (для влажного пара, зависящую от начальной степени влажности).

Из уравнения (10) непосредственно получается

$$\frac{dp}{d\rho} = k \frac{p}{\rho},$$

откуда:

$$a = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}. \quad (11)$$

Подставляя это значение в выражение для критерия Va , находим

$$\frac{\rho \omega^2}{kp} = \text{idem}. \quad (12)$$

В частном случае постоянных газов, для которых уравнение состояния с достаточной точностью можно писать в форме:

$$\frac{p}{\rho} = gRT,$$

уравнение (11) приводится к виду:

$$a = \sqrt{gkRT}$$

и, соответственно, вместо выражения (12) получается:

$$\frac{\omega^2}{gkRT} = \text{idem.}$$

Существенное значение для теории подобия имеет то обстоятельство, что в систему уравнений, определяющих рассматриваемые явления, величина p входит не только под знаком дифференциала. В обычных уравнениях гидродинамики содержится градиент давления, абсолютная же величина давления в них не входит. Поэтому в качестве множителя преобразования полей давления принимается отношение перепадов, а не абсолютных давлений.

При исследовании газодинамических явлений в круг рассмотрения входит также абсолютное давление, которым определяется значение плотности.

В общей теории подобия показывается, что в такого рода случаях возникает добавочное условие подобия

$$\frac{\Delta p}{p} = \text{idem.} \quad (13)$$

Сопоставляя уравнения (12) и (13), находим

$$\frac{k\Delta p}{\rho\omega^2} = \text{idem}$$

или

$$kEu = \text{idem.} \quad (14)$$

Но подобные явления характеризуются одинаковыми значениями критерия Eu ; следовательно должно быть

$$k = \text{idem.} \quad (15)$$

Это означает, что полное подобие может иметь место только при том условии, если сопоставляются потоки газов одинаковой атомности. Отметим, что условие (15) может быть получено непосредственно из рассмотрения уравнения (10), — в этом случае уравнение (15) получает смысл необходимой предпосылки подобия адиабатических изменений состояния.

Таким образом, при исследовании газодинамических явлений система определяющих условий подобия дополняется тремя новыми требованиями:

$$Ba = \text{idem,}$$

$$k = \text{idem,}$$

$$\frac{\Delta p}{p} = \text{idem,}$$

и, следовательно, применительно к стационарному движению содержит четыре уравнения: $Re = \text{idem}$, $Ba = \text{idem}$, $k = \text{idem}$, $\frac{\Delta p}{p} = \text{idem}$.¹

Однако этому строгому выводу может быть противопоставлено следующее рассуждение. Как уже было отмечено ранее, при достаточно больших величинах критерия Re , он теряет значение опреде-

¹ Более подробное исследование показывает, что между отдельными критериями существуют дополнительные зависимости, которые ограничивают свободу выбора величин.

ляющего критерия. Вместе с тем не исключена возможность, что в этих условиях количественные эффекты, связанные с сжимаемостью жидкости, еще весьма слабо выражены, и следовательно законно исключить из рассмотрения оба остальных критерия. Итак, правильно поставить вопрос о существовании автомодельной области, как интервала, в пределах которого изменение критерия Re уже не оказывает заметного влияния, а сжимаемость жидкости еще не проявляется. Теоретически вопрос этот не может быть решен, так как теория подобия вообще не дает методов количественной оценки влияния изменения критерия. Поэтому для установления самого факта существования автомодельной области и определения ее границ необходимо прямое экспериментальное исследование.

Следует отметить, что все изложенное относится к случаю движения жидкости при малых разностях температуры. В более общем случае — если разности температур настолько значительны, что нельзя пренебречь явлениями теплообмена в потоке с одной стороны и влиянием температуры на физические константы с другой, — необходимо ввести еще два определяющих критерия:

$$\frac{\Delta T}{T} = \text{idem} \quad \text{и} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \text{idem},$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости и α — коэффициент ее температуропроводности.

При решении вопроса о существовании автомодельной области и определении ее границ необходимо иметь в виду следующее. Пределы области влияния критерия Re существенным образом зависят от геометрических свойств системы. В каналах сложной конфигурации при наличии изменений направления потока, сужений или расширений канала и т. п. возникают местные явления, которые с одной стороны искажают гидродинамические условия процесса, а с другой — вызывают уплотнение среды в отдельных областях поля течения.

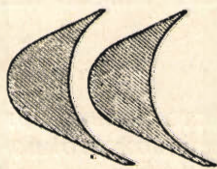


Рис. 1. Профиль канала с направляющим аппаратом.

Поэтому общего решения, охватывающего все случаи, по самому существу задачи дать невозможно. Отсюда следует, что при экспериментальном изучении вопроса об автомодельности надо выбирать объекты исследования, характерные для того типа оборудования, которое в дальнейшем предполагается испытывать по методу модели. В виду того, что мы изучали вопрос под углом зрения возможности применения метода модели к испытанию элементов турбины, в качестве объекта исследования была выбрана система, состоящая из направляющего аппарата и двух лопаток диска Кертиса с несколько усложненной формы (рис. 1).

Методика эксперимента определяется выбором тех признаков, которые кладутся в основу суждения о существовании автомодельности. Если исходить из соображений общей теории подобия, то первичным, и вместе с тем достаточным, признаком полного подобия процессов движения жидкости несомненно должно считать подобие скоростных полей, так как кинематическое подобие имеет своим необходимым следствием подобие динамическое.

Однако достаточно подробное экспериментальное изучение картины распределения скорости представляет чрезвычайно большие

едва ли преодолимые, трудности. Поэтому почти вынужденным является переход к исследованию динамических условий процесса. Конечно утверждение подобия процессов течения на основании подобия картин распределения давлений, строго говоря, не является вполне закономерным. Теоретически не исключена возможность установления подобных картин распределения давления в потоках кинематически между собой не подобных, ибо соотношение между кинематическим и динамическим подобием выражается в том, что можно утверждать существование однозначной зависимости Eu от Re , но вместе с тем неправильно рассматривать Re , как однозначную функцию от Eu . Как известно, обширный экспериментальный материал по законам сопротивления в простейшем случае прямой цилиндрической трубы полностью подтверждает эти теоретические соображения. В частности хорошо известен тот факт, что одному и тому же коэффициенту сопротивления могут отвечать совершенно различные формы движения. Однако весьма мало вероятно, чтобы в случае потока с очень не простым руслом и безусловно усложненного разнообразными местными явлениями могло иметь место подобие детальных картин распределения давления без кинематического подобия. Несомненно, установление подобия перепадов давления между большим числом правильно выбранных характерных точек потока является достаточным основанием для утверждения автомодельности движений.

Таким образом в качестве основного признака автомодельности в настоящем исследовании принимается подобие распределения давления в поле течения. Если картины распределения давления в каких-либо своих частях не подобны, то это является основанием для утверждения, что автомодельность не имеет места. Однако, составляя суждение о свойствах процесса движения, следует иметь в виду, что он представляет собой целую совокупность явлений, отличающихся различными особенностями. На главное движение, которым определяются основные свойства потока, накладываются вторичные течения, создающие разного рода местные эффекты. При рассмотрении вопроса об автомодельности правильно различать главное движение и местные течения. Вовсе не исключена возможность подобия главных движений при некоторых различиях вторичных эффектов. Разумеется, неподобие местных течений должно соответствующим образом отразиться на картине распределения давления и привести к заключению об отсутствии автомодельности. Между тем многие практически важные свойства потока определяются именно главным движением и лишь в незначительной степени зависят от местных явлений. Так например, для столь важного практически эффекта, как силовое воздействие потока на канал, многие местные явления не существенны.

Все эти соображения приводят к заключению о целесообразности введения наряду с представлением о детальном подобии в установленном ранее смысле, которое в дальнейшем будем называть полным подобием также представления о подобии потоков в отношении главных движений, приближенное подобие. Признаки полного подобия рассмотрены нами ранее.

В качестве основы для суждения о приближенном подобии мы принимаем хорошо известный вывод общей теории подобия, что признаком независимости свойств движения от критерия Re является постоянство усредненного значения критерия Eu .

Таким образом мы ставим своей задачей определение границ двух

областей. Первая из них — область полной автомодельности — характеризуется подобием распределения давления. Вторая — область приближенной автомодельности — характеризуется постоянством усредненного по всему полю значения критерия Eu , или — что то же самое — квадратичным законом сопротивления.

§ 3. Постановка эксперимента¹

Изложенными соображениями определен выбор экспериментальной методики. Основная задача заключается очевидно в изучении картин распределения давления.

Как уже ранее было отмечено, для суждения о полном подобии рассматриваемых процессов — движения по каналу сложной конфигурации, сопровождающегося явлениями местного характера, — достаточно изучить подробно поля давления и выяснить степень подобия перепадов давления между большим числом характерных точек системы. Вместе с тем знание детальной картины распределения давлений

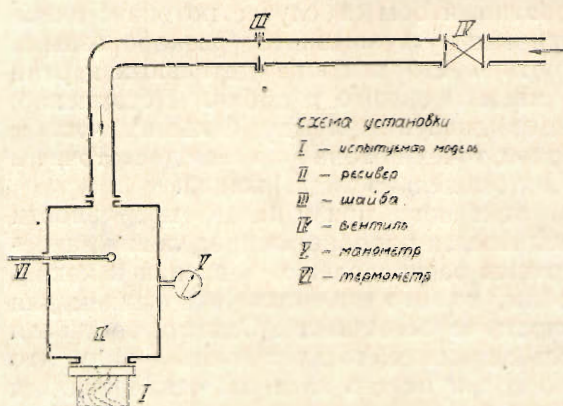


Рис. 2. Принципиальная схема установки.

дает возможность установить порядок отклонения от полного подобия сопоставляемых движений и содержит в себе все элементы, необходимые для вычисления тех величин, на рассмотрении которых основывается суждение о существовании приближенного подобия — в ранее установленном смысле этого понятия.

Таким образом центральным моментом эксперимента являлось определение полей давления исследуемой системы при различных скоростях потока.

Экспериментальный stand был организован на площадке, предоставленной заводом „Красный Путиловец“.

В качестве рабочей жидкости, протекающей по исследуемой системе, применялся воздух, получаемый от компрессорной установки мощностью в 120 л. с.

Исследования проводились при различных расходах воздуха в пределах от 150 до 550 м³/ч.

Подача воздуха регулировалась от руки при помощи вентилля. Во всех опытах противодействие оставалось практически неизменным, так как рабочая жидкость истекала из лопатки непосредственно в атмосферу. Начальное давление в цилиндре, из которого воздух поступал в направляющий аппарат, не превышало 2 ата. Принципиальная схема установки приведена на рис. 2.

Легко понять, что в конкретных условиях описываемого исследования — при столь сложном объекте, как лопатка в совокупности

¹ В проведении эксперимента участвовали М. Л. Савицкий, Н. В. Зайцева и А. В. Константинова.

с направляющим аппаратом, единственно возможным, по техническим причинам, являлось изучение распределения давления на стенке канала.

В целях облегчения эксперимента исследование проводилось с элементами турбины не натуральных размеров, а с увеличенной в четыре раза моделью, изготовленной из выдержанного дерева специальной породы.

Внешний вид модели представлен на рис. 3. Измерение давлений производилось в сорока точках, расположенных в определенном порядке по крышке лопатки и вдоль средней линии боковых стенок канала. В качестве измерительных трубок, воспринимающих давления на стенки, применялись медные, тонкостенные капилляры с внутренним диаметром в 0,5

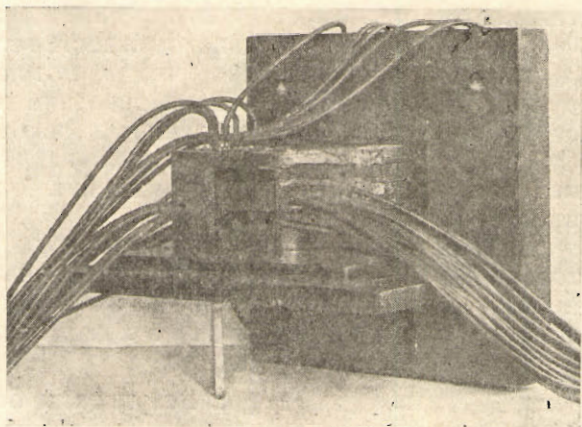


Рис. 3. Внешний вид установки.

мм. Заделки их производились таким образом, что трубки располагались по нормали к соответствующему элементу поверхности. Концы трубок с прямоугольными кромками были весьма тщательно зачищены. Этим до некоторой степени устранялись возможные источники местных возмущений потока. Схема расположения точек замеров показана на рис. 4. Из рассмотрения этой фигуры становится очевидным, что выбранное количество точек и их расположение дают возможность составить достаточно подробное суждение о характере полей давления.

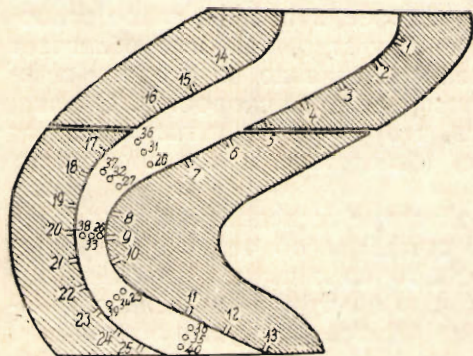


Рис. 4. Схема расположения точек измерения давлений на стенке канала.

Измерение давлений производилось при помощи обычных тягомеров Креля и U-образными манометрами, причем один конец манометра сообщался с атмосферой, а к другому через стеклянную гребенку посредством толстостенных резиновых трубочек присоединялась группа измерительных трубок. Таким образом, по манометру непосредственно определялось давление, избыточное над атмосферным.

В зависимости от величины измеряемого давления применялись либо тягомеры различных уклонов, либо U-образные трубки, заполненные водой или ртутью. Для определения расхода продуваемого воздуха на трубопроводе была установлена остроконечная шайба. Перепад давления в шайбе измерялся U-образным манометром. Сверх того, для каждого режима, отвечаю-

этого определенному расходу воздуха, регистрировались температура и давление воздуха в ресивере, а также температура помещения и атмосферное давление.

Анализируя выбранную методику основных измерений, очень важно дать себе отчет в следующей, весьма существенной особенности изучаемого процесса. При движении по криволинейному каналу, в противоположность простейшему случаю движения по прямой цилиндрической трубке, неправильно отождествлять давление на стенку канала со статическим. Очевидно, что в потоке жидкости, ограниченном руслом сложной конфигурации, давление на стенку представляет собой сумму статистического давления и некоторой части динамического. Однако этим обстоятельством ни в какой мере не снижается закономерность принятого метода суждения о подобии рассматриваемых процессов.

Действительно, если явления подобны, то должно иметь место не только подобие статистических и динамических давлений, взятых порознь, но также и подобие тех сложных их комбинаций, которые образуют давление на стенку в каждой данной ее точке.¹

§ 4. Результаты опыта

Выполненное исследование распадается на две серии опытов. Первая серия проводилась на модели, конфигурация которой в точности отвечала конфигурации образца. Поэтому лопатка и направляющий аппарат были разделены между собой зазором в один миллиметр.

По принципу действия активной лопатки давление во входном и выходном сечениях должны быть одинаковыми, и следовательно надо было ожидать, что при движении воздуха по лопатке в зазоре должно установиться давление, практически равное давлению выхода, т. е. давлению окружающей среды. При этих условиях наличие зазора не вносило бы никаких осложнений, связанных с утечкой воздуха, с искажением поля давления и т. п. Скорее, наоборот, такое расположение представляет известное преимущество, так как облегчает производить некоторые измерения непосредственно во входном сечении — например установить картину распределения скоростей. Однако, при первых же опытах обнаружилось, что в зазоре устанавливается значительное избыточное давление, вследствие чего происходит довольно заметная утечка воздуха.

Это обстоятельство, при выбранной схеме исследования, исключает возможность получения правильного суждения об основной характеристике — расходе воздуха, протекающего по лопатке. Поэтому мы вынуждены были провести вторую серию опытов на модели с уничтоженным зазором. Данные этой серии опытов и явились основанием для окончательных выводов.

При этом однако естественно поставить следующий весьма важный вопрос. Справедливо ли и в какой мере непосредственное перенесение полученных выводов на случай движения жидкости по модели с зазором, и следовательно, возможно ли использовать их для сужде-

¹ Эта идея, теоретически совершенно бесспорная, обычно весьма трудно воспринимается и вызывает к себе критическое отношение. В связи с этим было поставлено специальное исследование, которое полностью подтвердило теоретические соображения. Опыты проводил студент Физико-механического института В. Стефановский.

ния о процессах, происходящих на лопатке исследуемого типа в действительных условиях, когда между ней и направляющим аппаратом имеется зазор.

Очевидно для разрешения этого вопроса необходимо установить, какое влияние оказывает наличие зазора на характер потока. Достаточным основанием здесь могут служить результаты сопоставления

детальных картин распределения на стенки канала, относящихся к одинаковым режимам до и после уничтожения зазора. На рис. 5 приведены кривые распределения избыточных давлений на стенки, полученные после устранения зазора. Построение эпюры давлений производилось следующим образом. В целях наиболее удобного и ясного изображения эпюр за начало отсчета для давлений на вогнутую и выпуклую сторону приняты не контуры канала, а линии OO и $O'O'$, точно воспроизводящие конфигурацию соответствующих стенок. Положительные давления на вогнутую сторону — линия OO — отложены влево, на выпуклую — линия $O'O'$ — вправо; отрицательные — соответственно в обратные стороны. Для каждой группы из трех точек, расположенных на крышке, за начало отсчетов приняты прямые, соединяющие их. Величины давлений отложены на перпендикулярах к этим прямым, положительные — в направлении, противоположном к направлению потока, отмеченному на фигуре стрелкой; отрицательные по потоку.

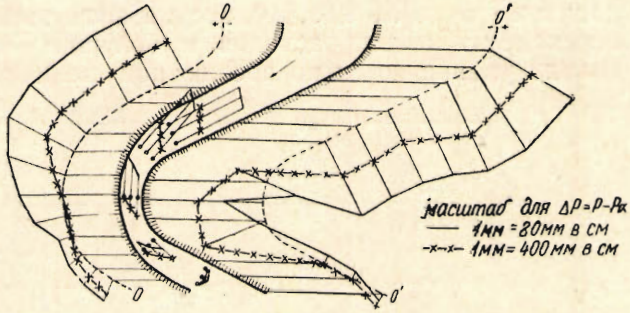


Рис. 5. Распределение избыточных давлений на стенки канала после устранения зазора.

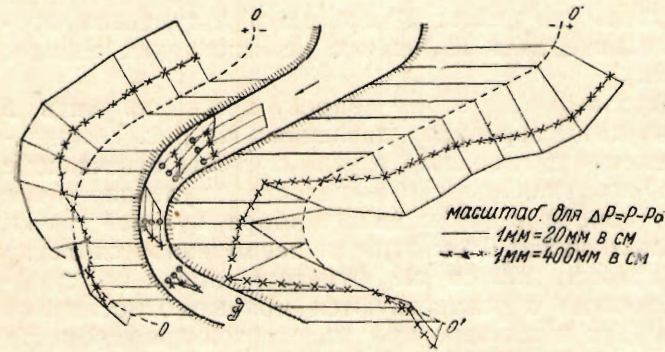


Рис. 6. Распределение избыточных давлений на стенки канала при наличии зазора.

Детальные картины распределения на стенки канала, относящихся к одинаковым режимам до и после уничтожения зазора. На рис. 5 приведены кривые распределения избыточных давлений на стенки, полученные после устранения зазора. Построение эпюры давлений производилось следующим образом. В целях наиболее удобного и ясного изображения эпюр за начало отсчета для давлений на вогнутую и выпуклую сторону приняты не контуры канала, а линии OO и $O'O'$, точно воспроизводящие конфигурацию соответствующих стенок. Положительные давления на вогнутую сторону — линия OO — отложены влево, на выпуклую — линия $O'O'$ — вправо; отрицательные — соответственно в обратные стороны. Для каждой группы из трех точек, расположенных на крышке, за начало отсчетов приняты прямые, соединяющие их. Величины давлений отложены на перпендикулярах к этим прямым, положительные — в направлении, противоположном к направлению потока, отмеченному на фигуре стрелкой; отрицательные по потоку. Приведенные кривые относятся к режимам с расходом воздуха примерно в $125 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $485 \text{ м}^3/\text{ч}$. На рис. 6 представлены аналогичные кривые для режимов с расходом воздуха того же порядка, но полученные еще до устранения зазора. Сопоставление кривых, изображенных на фиг. 5 и 6,

приводит к заключению, что наличие зазора не влияет существенно на характер потока, так как эпюры давлений для одинаковых режимов по своей конфигурации в основном ничем не отличаются друг от друга. Поэтому вполне закономерным следует признать распространение результатов, получаемых при исследовании модели с уничтоженным зазором на образец.

Перейдем теперь к анализу полученных опытных данных под углом зрения поставленного вопроса о границах автомодельности. Уже при сравнении кривых распределения давления (рис. 5) обнаруживаются совершенно очевидные и существенные различия полей давления, относящихся к области больших—порядка $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ —и малых—порядка $130 \text{ м}^3/\text{ч}$ —расходов. Так например, зона отрицательных давлений, расположенная в месте наибольшей выпуклости лопатки (точки № 8, 9, 10), весьма значительно видоизменяются при переходе от малых расходов к большим—отрицательные давления сильно уменьшаются по абсолютной величине, и вся зона заметно

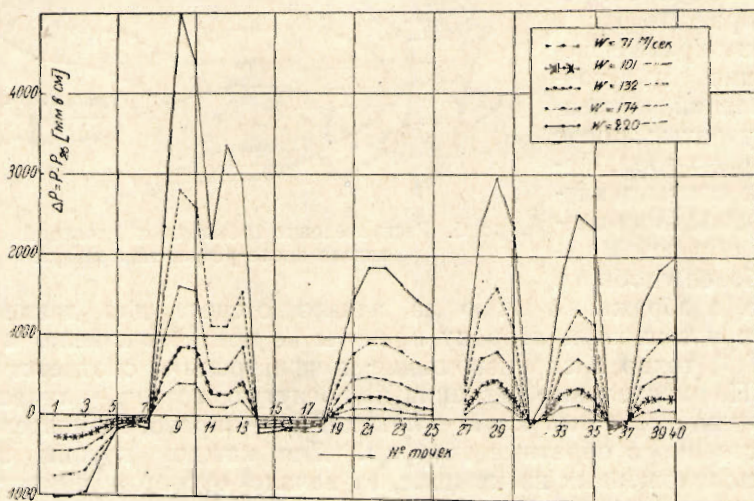


Рис. 7. Распределение давлений по точкам при различных скоростях воздуха.

сжимается. Это обстоятельство является серьезным аргументом против рассмотрения всего интервала изученных режимов, как единой автомодельной области.

Более полное представление по этому вопросу можно получить из анализа развернутой картины перепадов давления. На рис. 7 приведены кривые распределения давления по точкам системы, отвечающие различным скоростям воздуха, причем в качестве нулевой точки выбрана точка № 26 (вопрос о принципах выбора нулевой точки будет разобран несколько ниже). Несмотря на несомненное сходство общей конфигурации кривых, нельзя не отметить довольно существенных отличий, которыми характеризуются кривые, относящиеся к большим скоростям. Так например, кривая, отвечающая скорости 220 м/сек в области точек 11, 12, 13 и 15, 16, 17, имеет совершенно иной вид, чем кривые для меньших скоростей. Таким образом рассмотрение этой фигуры еще раз подтверждает уже сделанный нами вывод об отсутствии автомодельности в пределах всей области, охватывающей исследованные режимы. Теперь, прежде чем переходить к дальнейшему анализу экспериментального материала, остановимся на вопросе о выборе нулевой точки, так как он приобретает принципиальное значение и требует специального рассмотрения.

Действительно, как мы видели, величина p входит в состав кри-

териев подобия и в виде абсолютного давления, и в виде перепада давления:

$$\frac{\Delta p}{\rho \omega^2} = \text{idem} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta p}{p} = \text{idem}.$$

Не следует думать, что правильно было бы на основе второго условия вообще исключить Δp и рассматривать множитель преобразования величины p как простое отношение абсолютных давлений. Рассмотрение обоих требований, как независимых, имеет существенное практическое значение. Перепад давления характеризует собственно гидродинамические условия процессов, между тем как необходимость введения абсолютного давления отражает связь термодинамической природы — зависимость плотности от абсолютного давления. Практически важные свойства процесса, которые влияют и на коэффициент полезного действия лопатки и на силовое воздействие между потоком и лопаткой, выражаются через перепад давления. Поэтому правильно сохранить в качестве основной характеристики критерий Eu в его обычной форме.

Выполнение условия $\frac{\Delta p}{p} = \text{idem}$ следовало бы обеспечить при вполне строгой постановке опыта присоединением камеры противодавления для регулирования давления в выходном сечении. По техническим причинам мы не могли осуществить подобного рода контроля над давлением истечения. Едва ли это обстоятельство могло сколько-нибудь существенно повлиять на результаты опыта. Полезно отметить, что при скорости звука требование $\frac{\Delta p}{p} = \text{idem}$ удовлетворяется автоматически, так как отношение $\frac{\Delta p}{p}$ в условиях критического режима полностью определяется физическими свойствами среды.

Итак, характерным признаком подобия является постоянство отношений перепадов давления между сходственными точками. Это означает, что за нулевую точку должна быть выбрана какая-либо точка, расположенная в пределах исследуемой системы. Разумеется, удачный выбор точки является очень ответственным моментом, так как никаких принципиальных теоретических оснований для такого выбора нет. Поэтому здесь приходится руководствоваться соображениями практической целесообразности, а именно, необходимо, чтобы нулевой точке отвечали возможно более точные и устойчивые измерения. Очевидно правильным будет остановиться на одной из тех точек, в которых производилось измерение статистических давлений. Вместе с тем, полезно выбрать точку так, чтобы она лежала в зоне наименьшей кривизны русла, так как в этом месте поток отличается более простой структурой. Очевидно всем поставленным условиям отвечает, например, точка № 26, расположенная на крышке. Эта точка и была нами принята при обработке за нулевую.

Отметим, что нами была выполнена контрольная обработка данных опыта при других нулевых точках — №№ 38 и 40, которая с полной несомненностью показала, что выбор нулевой точки не может повлиять на основные выводы, если только точка эта не является выпадющей.

Как уже ранее было отмечено (§ 2), задача настоящего исследования заключается в установлении границ областей полной и приближенной автомодельности. Рассмотренные фигуры дают возможность соста-

вить лишь качественное суждение о существовании автомодельности. Очевидно, для нахождения того интервала скоростей, в пределах которого имеет место взаимное подобие процессов течения во всех деталях — полная автомодельность, — необходимо произвести количественную оценку степени подобия полей давления. Такая оценка может быть выполнена на основании анализа кривых множителей преобразования перепадов давления:

$$(\nu_{\Delta p})_k = \frac{\Delta p_{ki}}{\Delta p_{k_0}}, \quad (16)$$

где Δp_{ki} — перепад давления между какой-либо точкой „ k “ и условно нулевой при режиме „ i “, Δp_{k_0} — перепад давлений между сходствен-

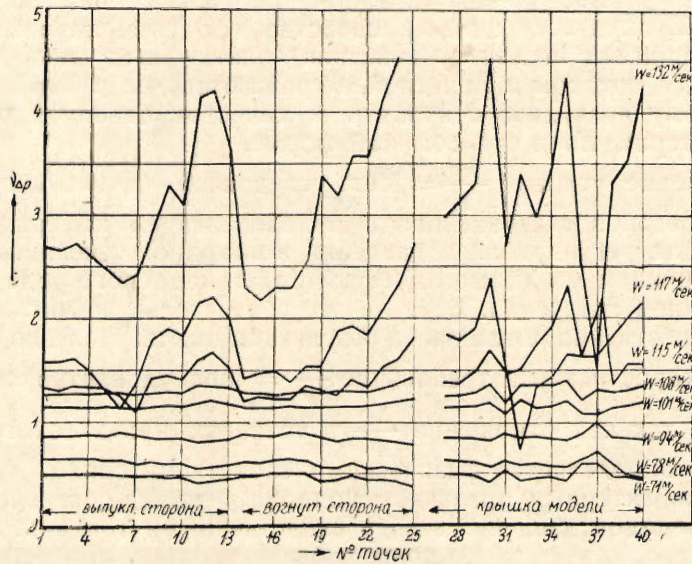


Рис. 8. Распределение $\nu_{\Delta p}$ по точкам при различных расходах воздуха.

ными точками при некотором определенном режиме „ o “, с которым сравниваются все остальные режимы. В дальнейшем будем условно называть такой режим эталонным режимом.

Очевидно при полном подобии процессов течения двух сравниваемых режимов множители преобразования $(\nu_{\Delta p})_k$ должны иметь одинаковое значение во всех точках системы.

На рис. 8 представлены кривые распределения $\nu_{\Delta p}$ по точкам при различных расходах воздуха.

При этом условно нулевой точкой попрежнему является точка № 25, а в качестве эталонного режима принят режим, характеризующийся скоростью в наиболее узком сечении в 72 м/сек. Кривые для режимов с максимальной скоростью, не превосходящей 115 м/сек, мало отклоняются от горизонтальных линий. Следовательно можно считать, что эти режимы принадлежат к единой автомодельной области, в пределах которой все процессы течения полностью подобны. Начиная с режима, отвечающего максимальной скорости в 115 м/сек, появляются резкие местные отклонения кривых от горизонталей. Это означает, что процесс течения перестает быть автомодельным во всех своих деталях, вследствие образования таких областей потока, внутри

которых возникают особого рода местные явления, изменяющие первоначальный характер движения. Для количественного определения степени неподобия сопоставляемых режимов построены кривые относительных отступлений (рис. 9). При этом под величиной относительного отступления в данной точке $\delta(\nu_{\Delta p})_k$ принимается отношение, определенное по закону

$$\delta(\nu_{\Delta p})_k = \frac{\nu_{\Delta p k} - \bar{\nu}_{\Delta p}}{\bar{\nu}_{\Delta p}}, \quad (17)$$

где $\bar{\nu}_{\Delta p}$ — среднее значение множителя преобразования, вычисленное,

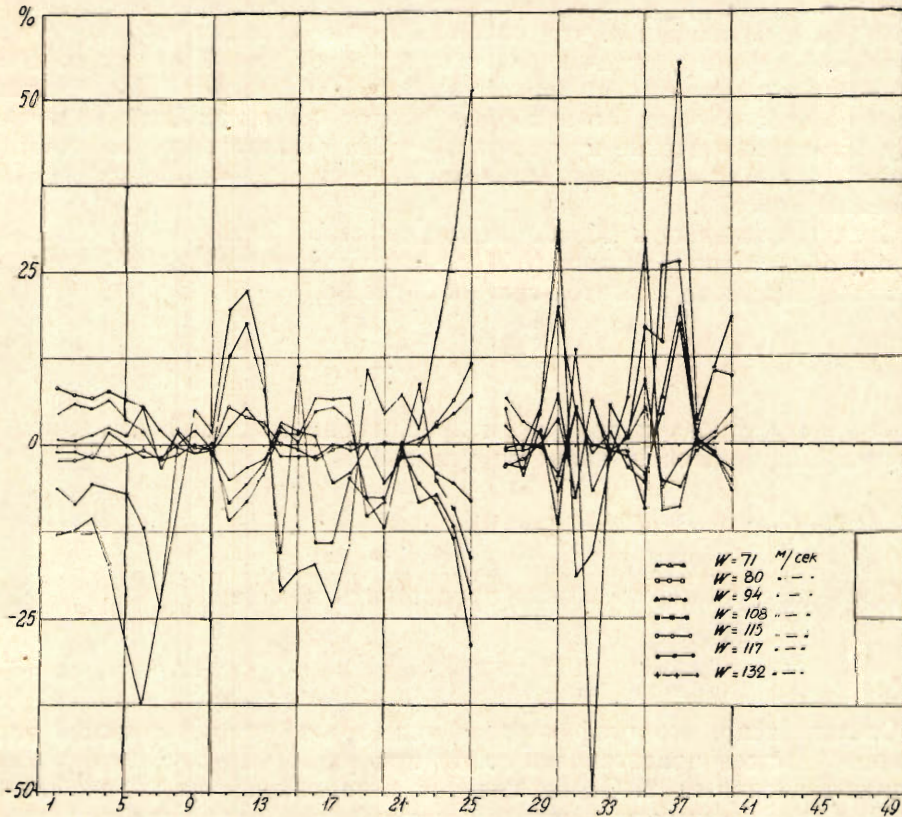


Рис. 9. Кривые относительных отступлений.

как среднее арифметическое из частных значений $\nu_{\Delta p}$ для каждого данного режима.

Очевидно для оценки полученных результатов надо принять известное соглашение о тех предельных значениях величины $\delta(\nu_{\Delta p})_k$, при которых режимы еще можно считать вполне подобными. При выборе такого рода предельного значения надо учитывать, с одной стороны, общую точность выполненного эксперимента в целом, а с другой — уровень практических требований в отношении количественного соответствия между образцами и моделью. Мы полагаем, что для этой величины целесообразно установить значение порядка $\pm 15\%$. Однако чисто механическая оценка степени подобия режимов по этому признаку была бы неправильной.

Наличие отдельных отклонений, превосходящих установленные пределы, еще нельзя рассматривать как бесспорный признак нарушения подобия, необходимо произвести анализ происхождения этих отступлений. Если при сопоставлении ряда смежных режимов выясняется, что отступления носят систематический характер, то это является признаком образования местных явлений, нарушающих детальное подобие (случай систематической ошибки измерения давления на стенку в данной точке мы считаем мало вероятным). В противном случае следует считать, что имеет место случайное выпадение точки, которое, разумеется, не должно влиять на оценку степени подобия режимов. Анализируя, на основе этих соображений, кривые фиг. 8 и 9, приходим к заключению, что автоматическую область образуют все начальные режимы, отвечающие скоростям от $\omega = 72$ м/сек до $\omega = 108$ м/сек включительно или от $Re = 50\,000$ до $Re = 76\,000$ (считая, как и во всех случаях по наиболее узкому сечению). Верхнему пределу отвечает значение критерия $Va = 0,3$. Таким образом область полного подобия — в установленном ранее смысле — простирается до значения $Va = 0,3$.

Следующим этапом обработки материалов является определение границ области приближенного подобия. С этой целью в логарифмической анаморфозе строится график функций

$$\frac{\bar{v}_{\Delta p}}{\bar{v}_p} = f(\bar{v}_\omega). \quad (18)$$

Как мы установили, признаком приближенного подобия, т. е. подобия главных движений, является условие

$$Eu = \text{idem} \text{ или } \frac{\bar{v}_{\Delta p}}{\bar{v}_p \cdot \bar{v}_\omega^2} = 1.$$

Последнее равенство можно представить в виде

$$\frac{\bar{v}_{\Delta p}}{\bar{v}_p} = \bar{v}_\omega^2.$$

Отсюда ясно, что график уравнения (18) в логарифмической анаморфозе должен представлять собой прямую линию с угловым коэффициентом, равным 2. Особо следует остановиться на методе определения усредненных значений множителей преобразования, входящих в состав рассматриваемого уравнения. Множитель $\bar{v}_{\Delta p}$ определяется как средняя арифметическая из всех частных значений $v_{\Delta p}$. Множитель \bar{v}_ω получается непосредственно как результат измерения по шайбе. Существенные трудности возникают при определении \bar{v}_p . Правильно было бы определить эту величину по закону

$$\bar{v}_p = \sum_{i=1 \dots n} \frac{v_{pi}}{n}.$$

Однако мы не располагаем необходимыми для этого данными. Поэтому нами принимается следующее упрощение. Вместо среднего значения \bar{v}_p в уравнение вводится величина v_p , отвечающая условиям в ресивере. Неточность, вносимая этим приемом, едва ли имеет суще-

ственное значение, тем более что рассматриваемый метод является основанием для суждения о приближенном подобии. Не следует только ставить слишком высоких требований в отношении степени точности соответствия между действительным угловым коэффициентом и теоретическим.

На рис. 10 приведена кривая $\frac{\bar{v}_{\Delta p}}{v_p} = f(\bar{v}_w)$ в логарифмической анаморфозе. Из рассмотрения этой кривой видно, что прямолинейный участок относится к области режимов от 42 м/сек до 165 м/сек. Угловой коэффициент для прямолинейного участка равен 2,29, что несомненно следует признать хорошим совпадением с теоретическим его значением. Верхний предел рассматриваемого интервала скоростей отвечает значению $Ba = \frac{\omega}{a} = 0,5$. Таким образом область автомодельности основного движения простирается значительно дальше, чем область полного подобия.

§ 4. Заключение

Итак, выполненное исследование дает основание для следующих утверждений. Существует область полной автомодельности, в пределах которой замещение основного объекта исследования любым другим, геометрически ему подобным, является во всех отношениях закономерным.

Эта область простирается от значения критерия Ba порядка 0,3 (в горловине). При дальнейшем увеличении скорости детальное подобие нарушается. Однако искажение потока проявляется прежде всего в местных явлениях, которые лишь в малой степени влияют на картину движения основной массы жидкости. Поэтому практически целесообразно ввести понятие о приближенной автомодельности, которая характеризуется практически достаточно точным подобием средних силовых взаимодействий между потоком и стенками. Признаком этой области является приближенное постоянство критерия Eu , т. е. приблизительно квадратичный закон сопротивления. Область приближенной автомодельности доходит до значений Ba порядка 0,5.

Весьма существенно, что все эти специфические свойства потока определяются геометрической конфигурацией канала. Поэтому при перенесении полученных результатов на случай движения по каналам много профиля необходима известная осторожность. Основой для обобщения могут явиться только результаты целого ряда исследований.

Физико-технический сектор ВИТГЭО предпринимает систематическое изучение газодинамических явлений. Настоящее исследование является первым этапом этого цикла работ.

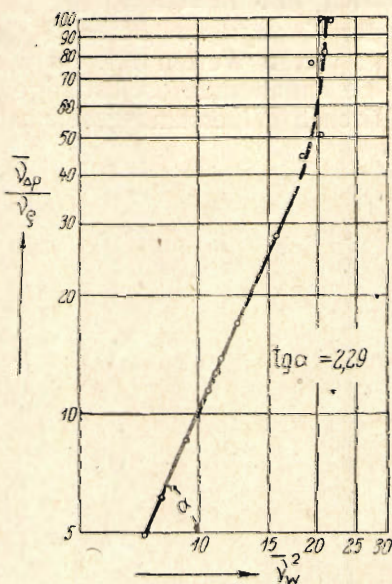


Рис. 10. Логарифмическая анаморфоза кривой $\frac{\bar{v}_{\Delta p}}{v_p} = f(\bar{v}_w)$.

ZUR FRAGE VON DEN GRENZEN DER „SELBSTTÄTIGEN MODELLHEIT“ IN DEN GASODYNAMISCHEN ERSCHEINUNGEN

Von A. Guchmann, V. Joukowsky und W. Tarassowa

Zusammenfassung

Die Beurteilung der „selbsttätigen Modellheit“¹ der Luftströmungen über die Dampfturbinenschaufel der erwähnten Art vollzog sich mit Hilfe der Vergleichung von Druckverteilungen auf die Wände. Es wurde festgestellt, dass das Gebiet der „selbsttätigen Modellheit“ sich bis zu dem Wert der Kenngrösse $Ba=0,3$ (im engsten Querschnitt) erstreckt. Bei den grösseren Werten von Ba wird die vollständige Ähnlichkeit gestört. Aber die annähernde „selbsttätige Modellheit“, welche den ungefähr quadratischen Widerstandsgesetz charakterisiert, wird bis zu $Ba=0,5$ beobachtet.

¹ Dieser Ausdruck bedeutet die Eigenschaft der Erscheinungen einander selbsttätig ähnlich zu bleiben.