

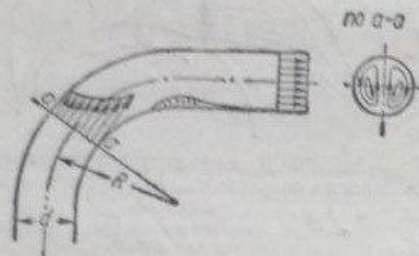
средней линии, осевой вихрь уменьшает относительную скорость вдоль и поперек потока.

На выходе из канала рабочего колеса скорость осевого вихря направлена обратно вращению, благодаря чему в открытом канале относительная скорость потока на выходе отклоняется в сторону, обратную вращению.

На входе в канал скорость осевого вихря, будучи также параллельна окружной скорости, в направлении вращения колеса и в открытом канале отклоняет относительную скорость потока в ту же сторону.

§ 11. ДВИЖЕНИЕ РЕАЛЬНОГО ГАЗА В КАНАЛАХ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

Наличие вязкости сильно изменяет картину движения. При движении идеального газа в круглой трубе постоянного сечения с прямолинейной осью, скорости во всех точках живого сечения одинаковы. Вязкость и в этом простейшем случае движения сильно искажает картину поля скоростей.



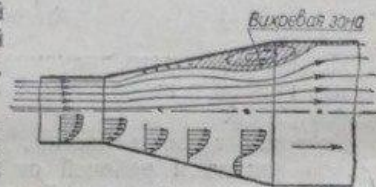
Фиг. 22. Влияние искривления трубы на форму движения потока.

Возникновение пограничного слоя приводит к тому, что скорости газовых частиц, расположенных на равных расстояниях от оси трубы, одинаковы. Максимальная по величине местная скорость соответствует точкам, расположенным на оси трубы. В трубах с прямоугольным, треугольным и более сложным периметром сечения, нормального к прямолинейной оси, поле местных скоростей имеет более сложную форму, чем в круглой трубе.

Искривление трубы вызывает дополнительные явления (фиг. 22): возникают отрывы потока от стенок, парные вихри и т. п.; поле скоростей искажается и становится несимметричным.

При расширении трубы по ходу потока (диффузор) движение газа становится менее устойчивым, картина движения усложняется, легко возникает отрыв потока от стенок, увеличиваются потери.

На фиг. 23 изображен профиль скоростей в различных сечениях по оси диффузоров. Причиной, вызывающей указанные



Фиг. 23. Профиль скоростей в различных сечениях по оси диффузора.

явления, служит пограничный слой, возникающий у стенок трубы. Доказательством этому могут служить опыты с отсасыванием пограничного слоя (фиг. 24). При отсасывании пограничного слоя в диффузорах с большим углом конусности поток заполняет все его сечения, причем приращение давления фактически получается равным вычисленному по уравнению Бернулли. Вращение канала вызывает весьма существенное отклонение потока от формы движения в неподвижном канале. Следует также учитывать, что при входе в каналы колеса, в зависимости от режима машины, поток встречает лопатку под некоторым положительным или отрицательным углом атаки, отрывается от стенок и вследствие этого образуются вихревые зоны.

Таким образом, процесс движения потока реального газа в каналах рабочего колеса весьма сложный и детальное его исследование имеет очень существенное значение.

Исследование структуры потока вязкой среды во вращающихся каналах колеса теоретически весьма затруднено, поэтому приходится обращаться к опытам и визуальным исследованиям, которые являются наиболее совершенным средством для качественного изучения формы движения реального газа. Имеется значительное количество визуальных исследований движения потока реальной среды в каналах рабочих колес, однако структура потока в каналах колеса до сих пор недостаточно изучена.

Расчет центробежных вентиляторов несколько видоизменяется в зависимости от величины угла β_2 и угла атаки. Поэтому рационально рассмотреть результаты визуального изучения потока в колесе применительно к различным типам рабочих лопаток.

Загнутые назад лопатки. На фиг. 25 показаны зарисовки потока, сделанные по фотоснимкам и непосредственным наблюдениям потока, произведенным Фишером [37]. Наблюдения других авторов в общем подтверждают аналогичную форму движения потока в каналах колеса.

Анализируя результаты исследования движения потока, можно сделать такие выводы.

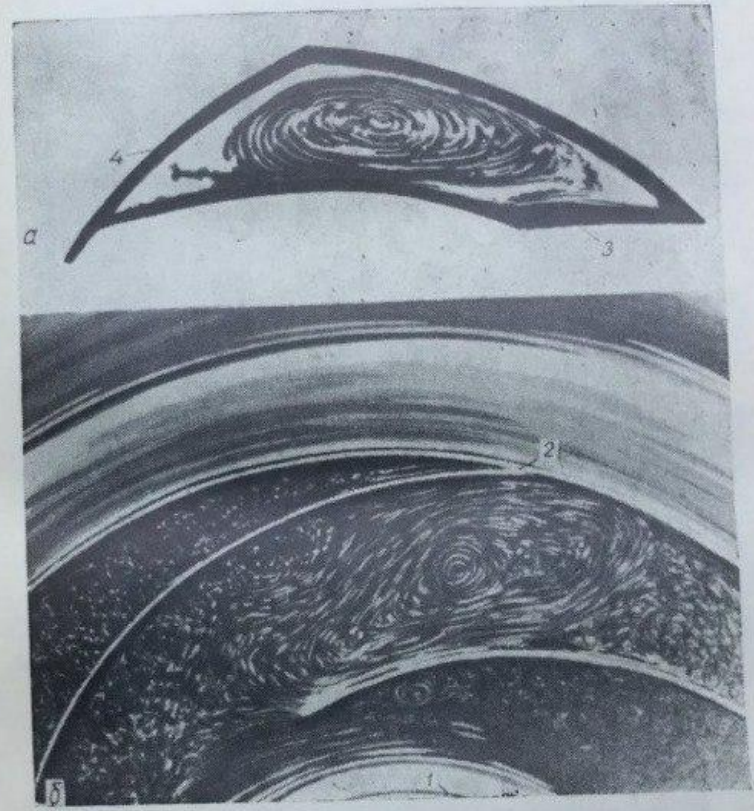
1. При движении потока по каналам колеса образуются две зоны: зона, заполненная активным потоком, и вихревая зона. В ряде случаев вихревая зона располагается с двух сторон активного потока.

2. Положение вихревых зон и их размеры зависят от производительности, формы и размеров канала и числа оборотов. Отклонение производительности машины от оптимальной сопровождается появлением угла атаки.

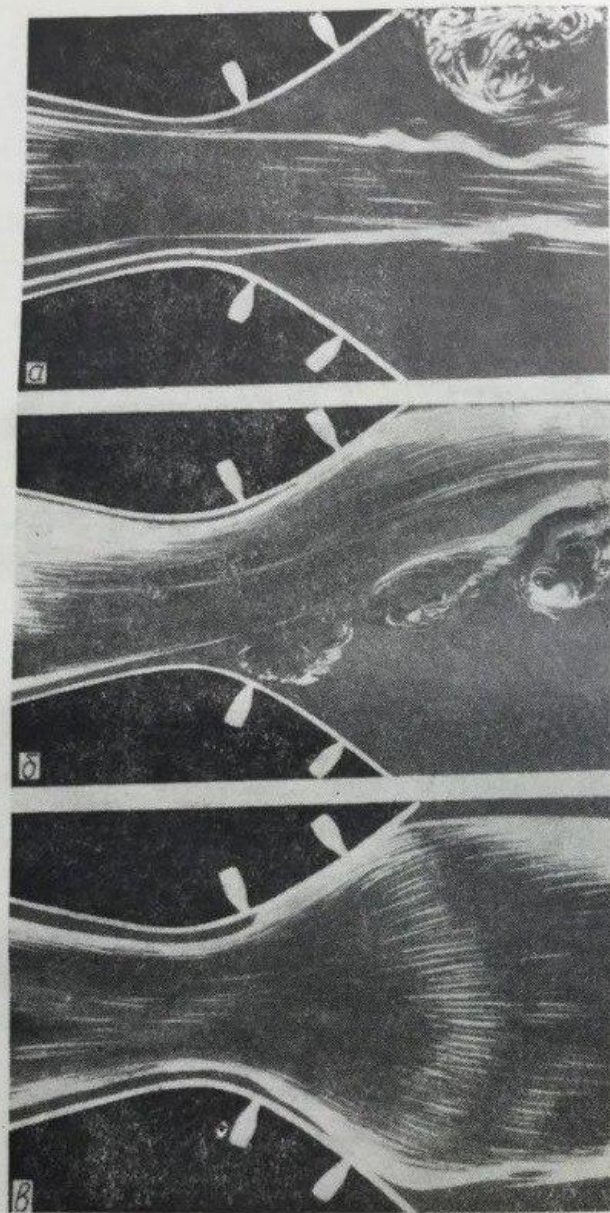
3. При положительных углах атаки (малых производительностях) образуется вихревая зона с нерабочей стороны лопатки, расширяющаяся к выходу из канала. Чем меньше производительность машины и больше число оборотов, тем большая часть канала занята вихревой зоной. Когда $\beta_{1\text{опт}} > \beta_{1\text{отт}}$, вихревая зона остается открытой.



n - число оборотов в мин., Q - расход в литрах, H - напор в см.
 Фиг. 25. Зарисовки потока в каналах колеса при $\beta_2 < 90^\circ$.

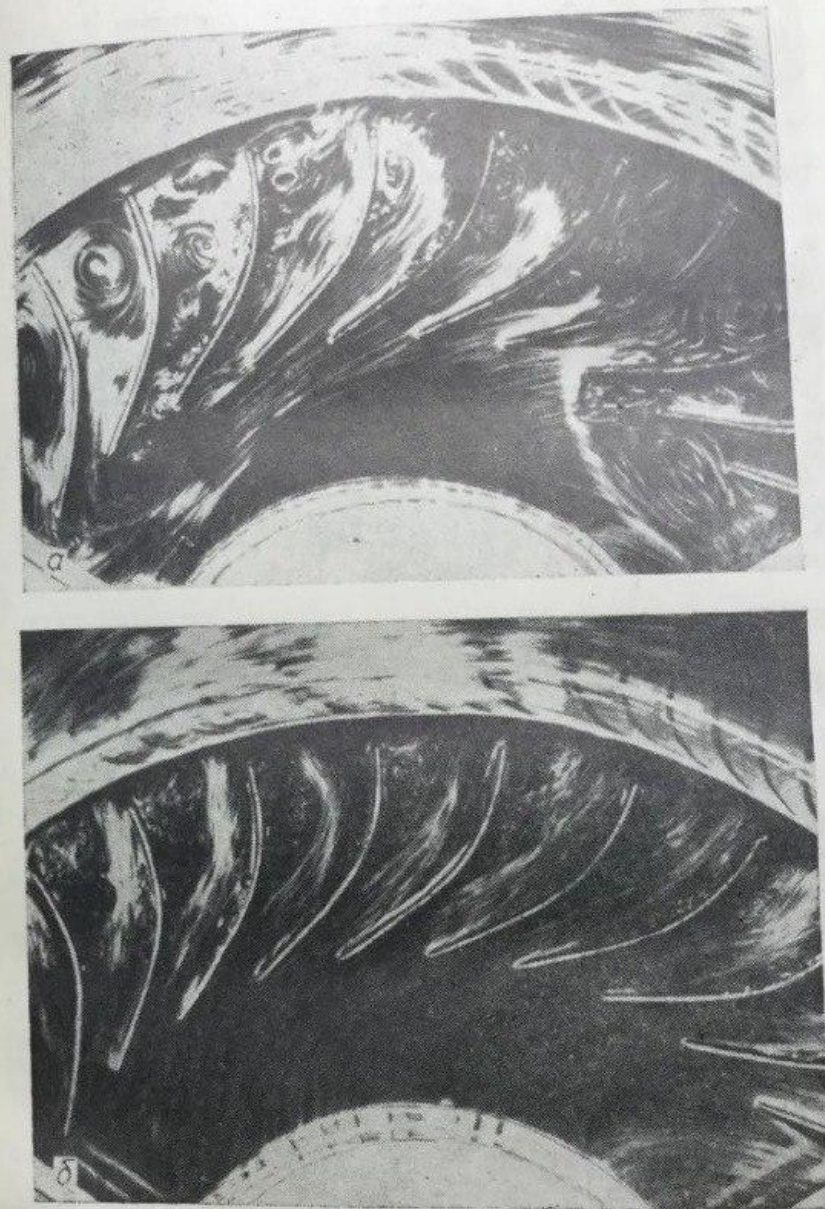


Фиг. 21. Осевой вихрь:
 1, 2, 3, 4 - бандажи.



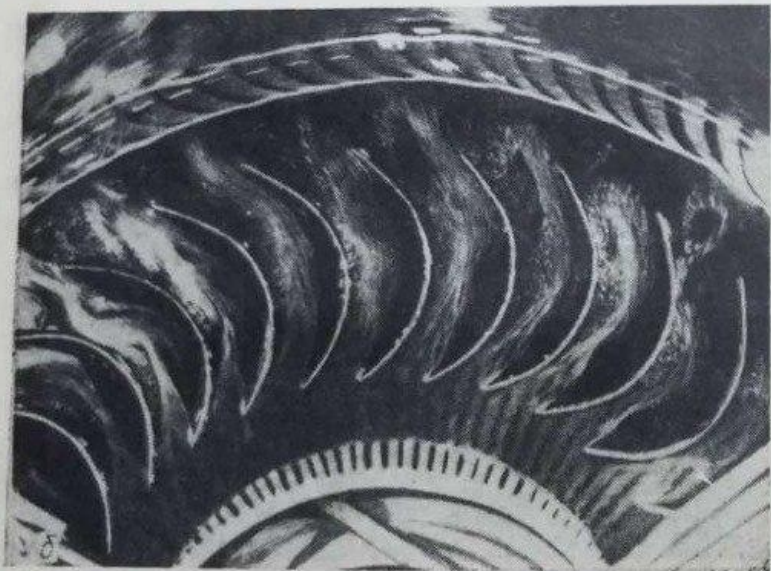
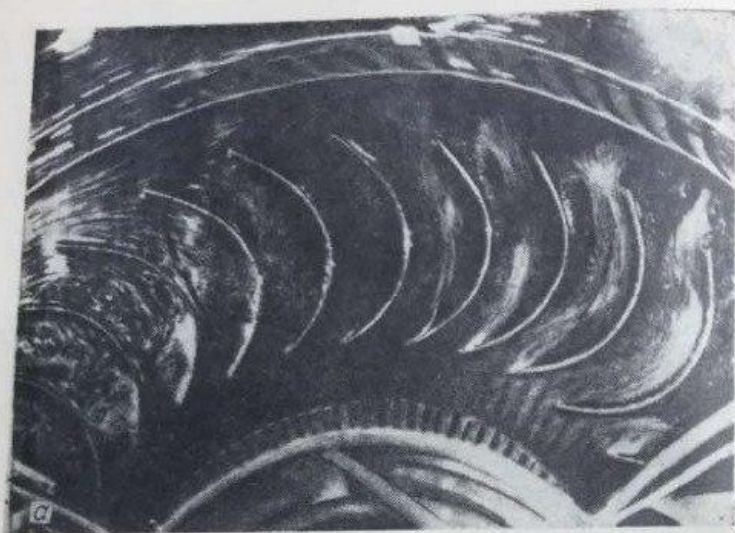
Фиг. 24. Влияние отсоса пограничного слоя на форму движения потока в диффузоре:

a — пограничный слой не отсасывается; *б* — пограничный слой отсасывается на верхней стенке канала; *в* — пограничный слой отсасывается на обеих стенках канала.



Фиг. 26. Движение потока в каналах колеса при $\beta_2 = 90^\circ$;

a — $\alpha_{at} < 0$; *б* — $\alpha_{at} > 0$.



Фиг. 28. Движение потока в каналах колеса при $\beta_2 > 90^\circ$:
 $a - \alpha_{am} > 0$; $б - \alpha_{am} < 0$.

4. При отрицательных углах атаки (больших производительностях) вихревая зона образуется с рабочей стороны и, как показывают наблюдения, замыкается на выходе из канала. Кроме этого, на выходе из канала с нерабочей стороны образуется большая или меньшая вихревая зона. Таким образом, в этом случае, как и в предыдущем, активный поток не заполняет всего сечения на выходе из канала.

5. При оптимальном режиме и режимах, очень близких к нему, с нерабочей стороны лопатки также образуются вихревые зоны. Следовательно, и в этом случае сечение на выходе не заполнено активным потоком.

При малых производительностях наблюдается перетекание потока из одного канала в другие — соседние, причем место перетекания меняется.

6. При положительных углах атаки скорости течения вдоль рабочей стороны лопатки меньше, чем вдоль вихревой зоны. Давления же больше вдоль рабочей стороны. Таким образом, относительные скорости поперек потока уменьшаются от вихревой зоны к рабочей стороне лопатки, а давления — в обратном направлении.

7. При повороте потока газа к каналам колеса происходит отрыв потока от переднего диска (покрышки) и образование значительной вихревой зоны. Избежать отрыва потока от покрышки возможно только в конических колесах с поворотным участком весьма плавных очертаний, изготовленным в виде конфузора.

Радиальные на выходе лопатки. При загнутых назад лопатках и углах β_2 , близких к 90° , лопатки получают «вогнутыми», приближающимися по форме к радиальным на выходе лопаткам. Поэтому последние можно рассматривать как частный случай «вогнутых» лопаток, загнутых назад.

Из этого следует, что картина движения потока в каналах с загнутыми назад лопатками в общем остается верной и для радиальных на выходе лопаток. Сказанное подтверждается визуальным изучением потока, проведенным Грюнагелем [35], [36].

Рабочее колесо, исследованное Грюнагелем, было закреплено на вертикальном валу. Вода вступала в колесо снизу. Сверху колесо было открытым и фотографировалась свободная поверхность жидкости при малом числе оборотов вала. Фотоаппарат вращался вместе с колесом, благодаря чему была сфотографирована картина потока в относительном движении.

На фиг. 26 приведены два фотоснимка из вышеуказанных опытов при $\alpha_{am} < 0$ и $\alpha_{am} > 0$.

Загнутые вперед лопатки. В целях выяснения картины движения потока в каналах, образованных загнутыми вперед лопатками с большим углом на выходе ($\beta_2 \geq 150^\circ$), в ЦАГИ было проведено исследование рабочего колеса центробежного вентиля-

тора [12]. При испытании определялось распределение давлений вдоль стенок межлопаточного канала. Картина распределения давления дает возможность охарактеризовать форму движения газа в каналах колеса.

Приводим окончательные результаты (фиг. 27):

1. На стенке переднего диска давления растут с увеличением радиуса; почти во всех точках, лежащих на одинаковых радиусах, значения напоров одинаковы.

2. Со стороны левой лопатки вблизи выхода из колеса имеет место резкое увеличение напора. Это указывает на то, что в

этом месте проходит активный поток, заставивший вихревую зону замкнуться.

3. У переднего диска имеется обширная вихревая зона, замкнутая лишь вблизи левой лопатки.

4. У левой лопатки в общих чертах картина та же, что и со стороны переднего диска. Вблизи выхода из колеса со стороны переднего диска наблюдается резкое увеличение напора.

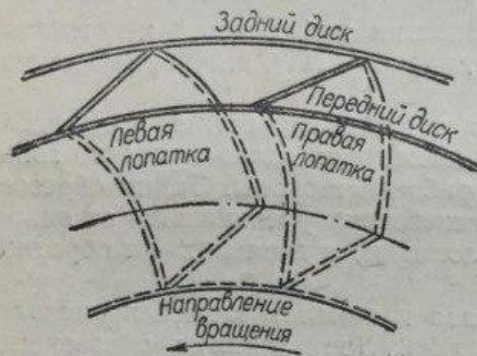
5. У тыльной стороны лопатки имеется обширная вихревая зона, а вблизи переднего диска проходит активный поток.

6. С рабочей стороны лопатки давления у заднего диска существенно выше, чем у переднего, исключение составляет лишь выходной участок лопатки.

7. По мере приближения к выходу картина давлений на всех режимах становится все более упорядоченной — давления вдоль ширины лопатки выравниваются, и на выходе значения давлений во всех точках почти одинаковы.

На фиг. 28 приводятся снимки Грюнагеля, которые согласуются с распределением давления в каналах колеса центробежного вентилятора, испытанного в ЦАГИ.

Следует отметить, что все визуальные исследования дают изображение плоского потока; в разных сечениях картины потока могут существенно отличаться друг от друга.



Фиг. 27. К замеру давлений в колесе центробежного вентилятора.