

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КОЛЕСЕ

RESULTS OF AN INVESTIGATION OF WORKING PROCESS IN CENTRIFUGAL IMPELLER

ЖАРОВ Геннадий Алексеевич, с.н.с.,
ОАО «ВНИИАЭН», г. Сумы, Украина.

Abstract. Static pressures on the surface have been measured as well as impact pressures ahead inlet and outlet of interblades passage with optimum flow where indication of axial eddy exists. At low rotational speed the axial eddy is observed in the absence of flow through centrifugal impeller. As rotational speed is increased the axial eddy disturbs and disappears. In order to explain the nature of axial eddy it is proposed to use kinetic theory of fluids.

Посвящается моим учителям:

Г.Ф. Проскуре, Д.Я. Алексапольскому, Л.С. Шмуглякову, Э.Э. Рафалесу,
С.С. Серикову, С.С. Рудневу, В.А. Марцинковскому

В работах [1,2,3] изложены методика исследований, описание экспериментальных установок, первые результаты экспериментальных исследований. Статическое давление измерялось на поверхности одного межлопастного канала центробежного колеса в 163 точках, полное давление измерялось перед входом в межлопастной канал и перед выходом из него в 16 точках. Эпюра статического давления, в зависимости от квадрата расхода жидкости через рабочее колесо (РК), имеет линейную зависимость. Тангенс угла наклона прямой обозначим:

$$\overline{\Delta p_n} = \frac{\left(\frac{P_n - P_{ax}}{\gamma}\right)650 - \left(\frac{P_n - P_{ax}}{\gamma}\right)550}{100}, \quad (1)$$

где n – номер отбора давления,

P_{ax} – давление перед РК,

γ – удельный вес воды,

650 и 550 – показания манометра, измеряющего расход через насос.

Уравнение (1) в сочетании с уравнением Бернулли характеризует движение жидкости в РК. Отрицательное значение $\overline{\Delta p_n}$ свидетельствует об уменьшении давления в отборе при увеличении расхода, что соответствует увеличению относительной скорости W с увеличением расхода.

Положительное значение $\overline{\Delta p_n}$ свидетельствует об увеличении давления в отборе при увеличении расхода, что соответствует уменьшению относительной скорости W с увеличением расхода.

Изменение $\overline{\Delta p_n}$ по лопасти представлено на рис. 1.

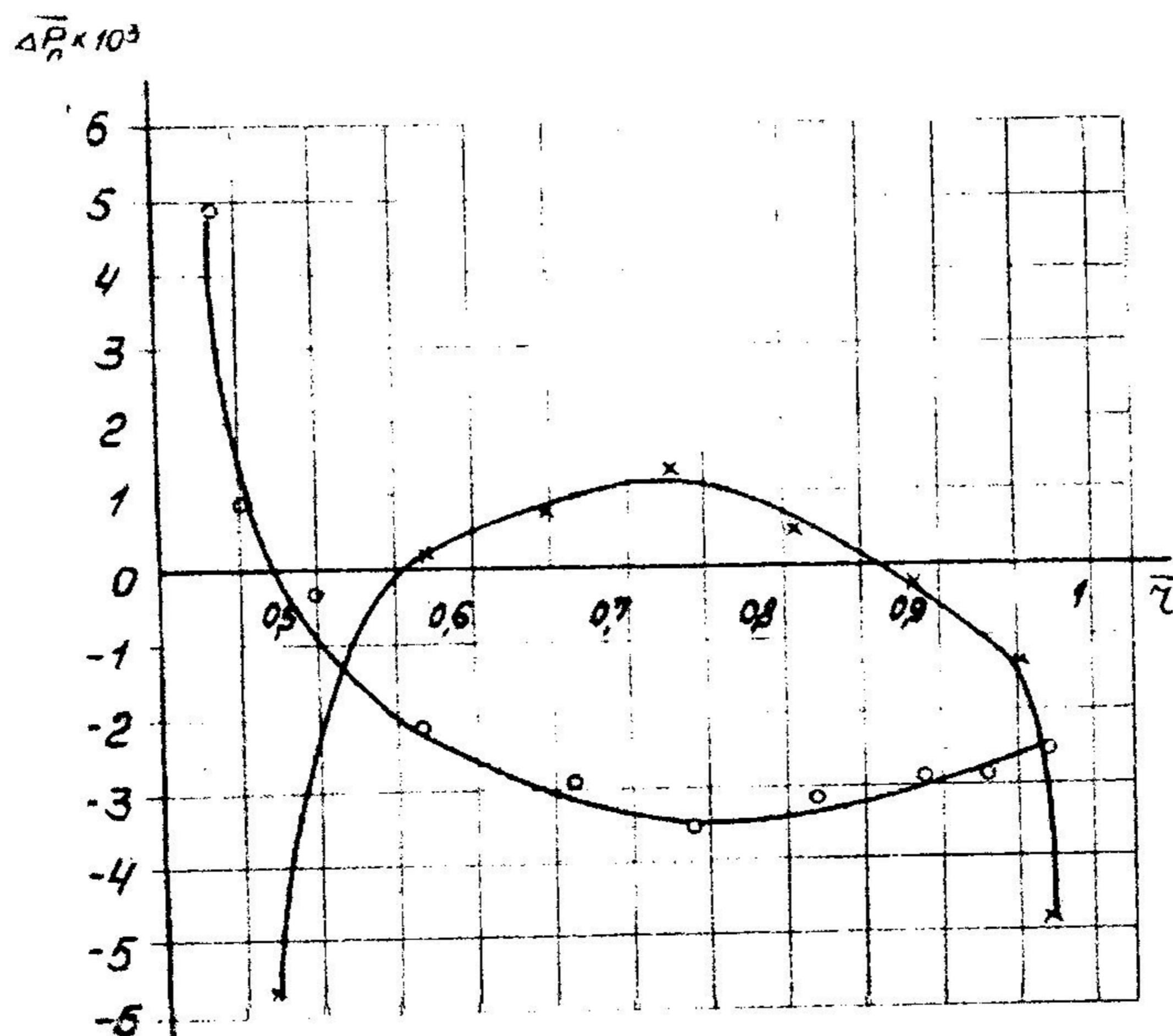


Рисунок 1 - Тангенс угла наклона эпюры статического давления по лопасти $x, 0$ — соответственно рабочая и тыльная сторона лопасти

На тыльной стороне лопасти от $\bar{r} < 0.47$ до входной кромки, $\overline{\Delta p_n}$ возрастает с увеличением расхода, что соответствует уменьшению относительной скорости с увеличением расхода.

При $\bar{r} = 0.47$ статическое давление не изменяется при увеличении расхода. При $0.47 < \bar{r} < 0.75$, $\overline{\Delta p_n}$ уменьшается, что соответствует уменьшению статического давления в отборе и соответственно увеличению относительной скорости W при увеличении расхода.

На рабочей стороне лопасти $\overline{\Delta p_n}$ возрастает от значений на входной кромке до $\bar{r} = 0.725$, что соответствует росту статического давления при увеличении расхода и соответственно снижению относительной скорости с увеличением расхода. При $\bar{r} = 0.55$ и $\bar{r} = 0.86$ давление остается постоянным при увеличении расхода — относительные скорости не изменяются при увеличении расхода. От $\bar{r} > 0.725$ до выходной кромки лопасти $\overline{\Delta p_n}$

уменьшается, что соответствует уменьшению статического давления и увеличению относительной скорости при увеличении расхода.

Распределение относительного давления

$$\bar{p}_n = \frac{p_n - p_{ax}}{\gamma} / \frac{U_n^2}{2g} \quad (2)$$

по средней струйке лопасти при оптимальном расходе представлено на рис.2.

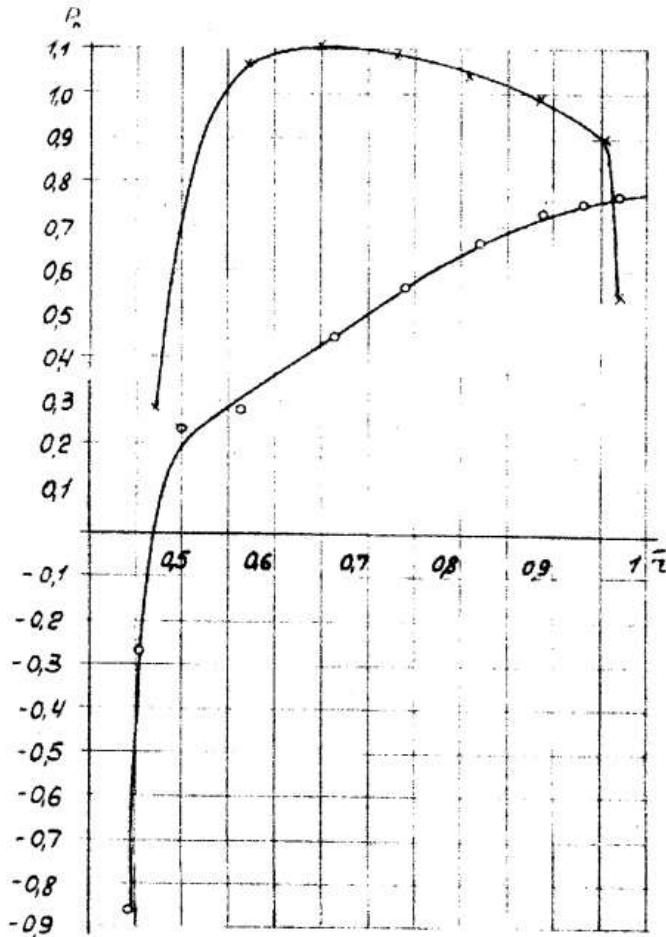


Рисунок 2 - Относительное давление по лопасти $x, 0$ – рабочая и тыльная сторона, соответственно

На рабочей стороне лопасти при $\bar{r} = 0,55$ и $\bar{r} = 0,86$ статическое давление равно 1, что возможно при $W=0$. На рабочей стороне лопасти при $0,55 < \bar{r} < 0,86$ относительное давление $\bar{p}_n > 1$, что возможно при обратном движении жидкости, при отрицательной относительной скорости, т.е. на рабочей стороне лопасти при оптимальном расходе существует вторичное течение, направленное по лопасти против основного потока.

Относительное давление на входе в РК при оптимальной подаче изменяется циклически (рис.3).

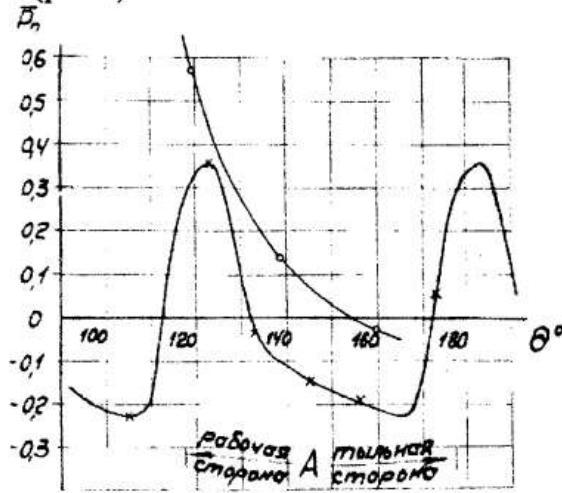


Рисунок 3 - Относительное давление на входе в РК
 X — на ведомом диске перед входными кромками,
 O — на ведущем диске за входными кромками,
 A — координаты входных кромок лопасти

Начало отсчета угла θ от выходной кромки рабочей стороны лопасти дренированного межлопастного канала.

Изменение Δp_n на входе в РК приведено на рис.4.

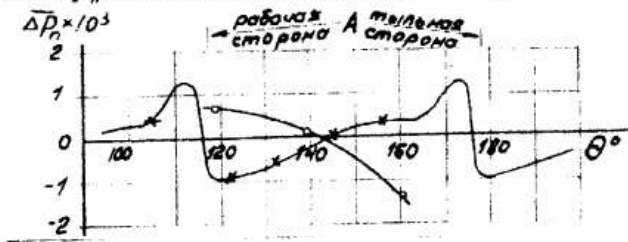


Рисунок 4 - Тангенс угла наклона эпюры статического давления на входе в РК
 X — на ведомом диске перед входными кромками,
 O — на ведущем диске за входными кромками,
 A — координаты входных кромок лопастей

В области повышенных давлений у рабочей стороны лопасти (рис. 3) при изменении расхода $\Delta p_n < 0$ (см. рис.4), т.е. с увеличением подачи относительная скорость тоже увеличивается. В области пониженных давлений у тыльной стороны лопасти $\Delta p_n > 0$, т.е. с увеличением подачи относительная скорость уменьшается.

Однако, за входными кромками на ведущем диске наблюдается обратное явление, т.е. у рабочей стороны лопасти, относительные скорости уменьшаются, а у тыльной — увеличиваются, соответственно, с увеличением расхода.

Относительное давление перед выходом из РК на радиусе $\bar{r} = 0.975$ и в средней части межлопастного канала на $\bar{r} = 0.822$ представлены на рис. 5.

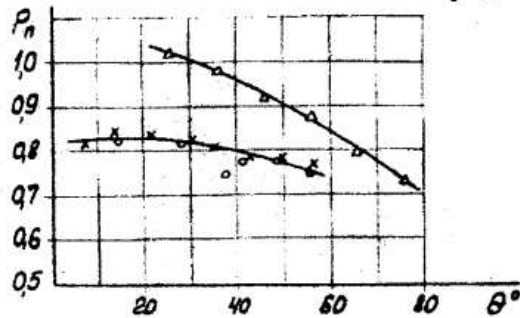


Рисунок 5 - Относительные давления
X, O - по $\bar{r} = 0.975$ на ведомом и ведущих дисках РК
 Δ - по $\bar{r} = 0.822$

Относительные давления на ведущем и ведомом дисках по $\bar{r} = 0.975$ практически одинаковы при оптимальном расходе. У рабочей стороны лопасти относительное давление выше на 10%, чем у тыльной стороны.

Относительное давление по $\bar{r} = 0.822$ на ведущем диске у рабочей стороны лопасти выше, чем у тыльной на 40% и $\bar{p}_n > 1$, что соответствует распределению давлений на рабочей стороне лопасти (см. рис.2).

При изменении расхода $\Delta \bar{p}_n$ по $\bar{r} = 0.975$ на ведущем и ведомом дисках не одинаковы, что указывает на сложность структуры потока на выходе из РК (см. рис. 6).

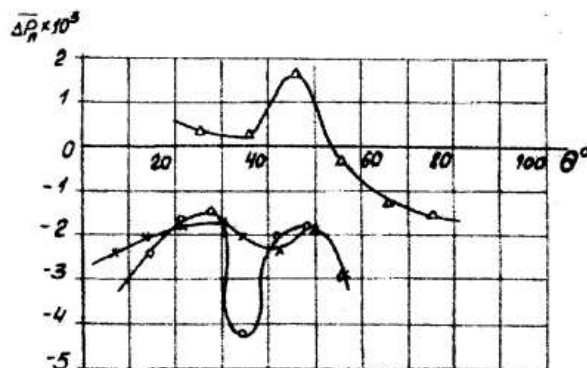


Рисунок 6 - Тангенс угла наклона эпюры статического давления
X, O - по $\bar{r} = 0.975$ на ведомом и ведущих дисках РК
 Δ - по $\bar{r} = 0.822$ на ведущем диске

По $\bar{r} = 0.822$ примерно половина потока в плане возле рабочей стороны лопасти замедляется, а у тыльной стороны лопасти ускоряется. Величины и направления относительных скоростей на входе и перед выходом РК при оптимальном расходе представлены на рис. 7,8.

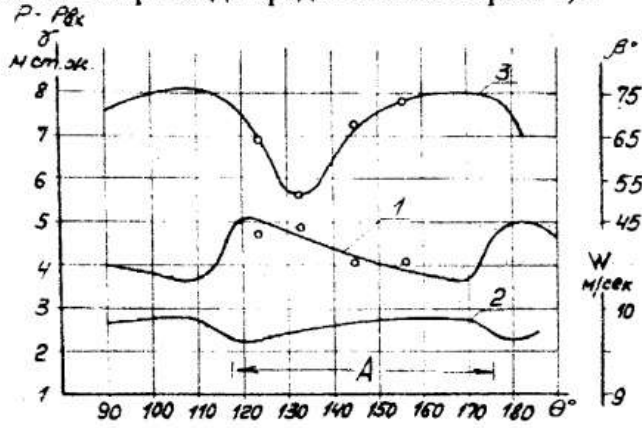


Рисунок 7 - Параметры потока на входе в РК

1 - полное давление $\frac{p - p_{02}}{\rho c^2}$,

2 - относительная скорость W , 3 - угол потока β

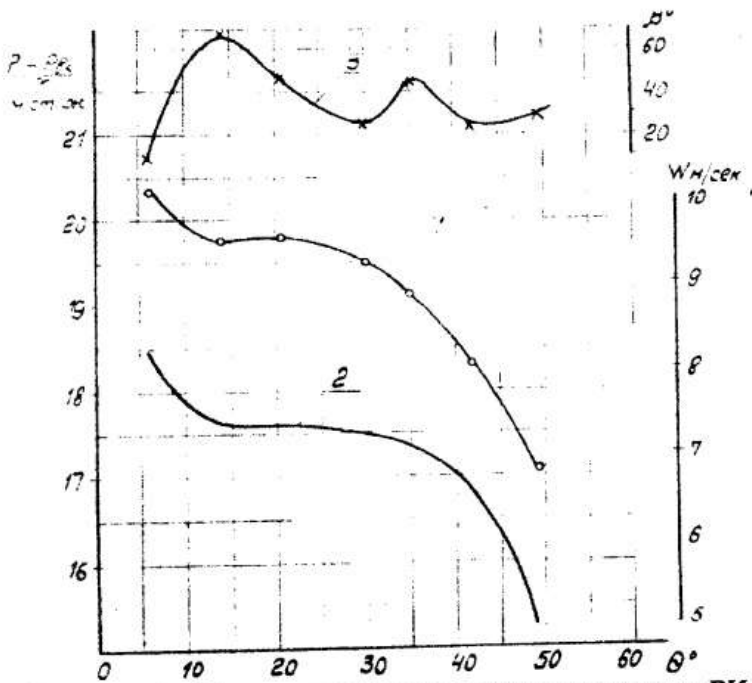


Рисунок 8 - Параметры потока перед выходом из РК

1 - полное давление $\frac{p - p_{02}}{\rho c^2}$,

2 - относительная скорость W , 3 - угол потока β

Полное давление в относительном движении на входе в РК в плане изменяется циклически (1), относительная скорость (2) изменяется от 9,6 до 9,9 м/с, повышаясь в направлении к тыльной стороне лопасти. Направление движения жидкости характеризуется углом β (3).

Полное давление в относительном движении перед выходом из РК (1) понижается к тыльной стороне лопасти. Относительная скорость уменьшается от 8,5 м/с у рабочей стороны лопасти до 5 м/с у тыльной, т.е. поток затормаживается перед выходом из РК у тыльной стороны лопасти.

Угол потока β (3) изменяется в широком диапазоне от 10 до 64° (угол лопасти $\beta_{2f}=25^\circ$)

Киносъемка движения жидкости в РК №1,2,3 производилась при расходах, близких к оптимальным. По результатам киносъемки построены траектории движения частиц полиэтилена, наложенные на один канал (рис. 9,10,11).

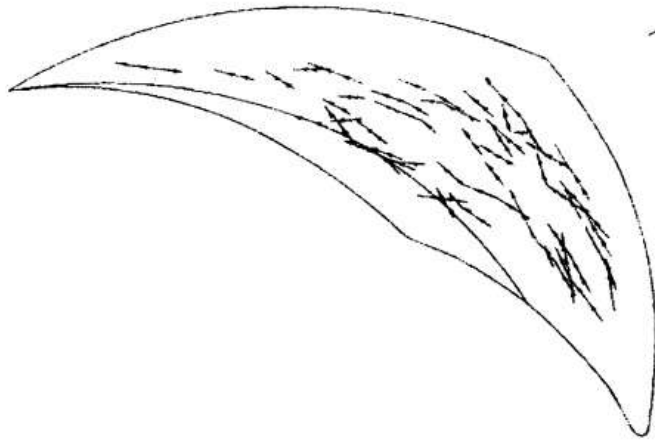


Рисунок 9 - Траектории частиц в относительном движении для РК №1

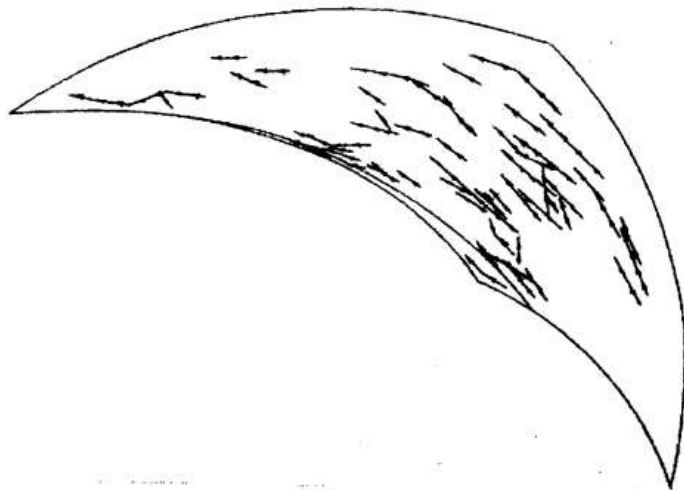


Рисунок 10 - Траектории частиц в относительном движении для РК №2

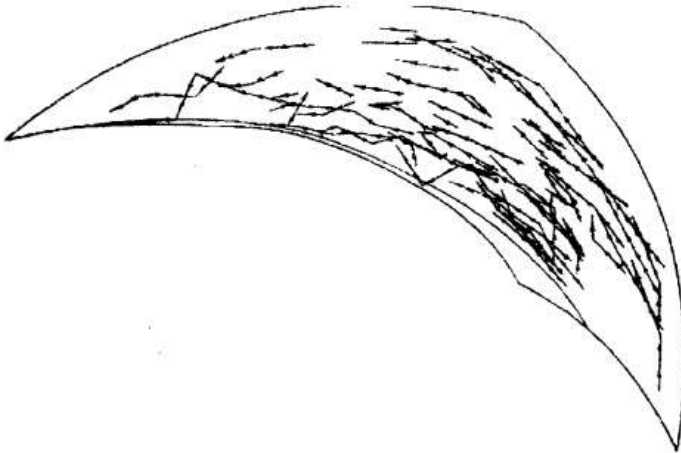


Рисунок 11 - Траектории частиц в относительном движении для РК №3

Общим для трех колес является, что частицы полиэтилена движутся на некотором расстоянии от тыльной стороны лопасти. Видимо это пограничный слой у тыльной стороны лопасти.

В трех колесах скос потока наблюдается в межлопаственном канале задолго до выхода РК.

Относительные скорости в межлопаственном канале (рис.12,13,14) определялись по статическим давлениям (РК №1) по результатам кино съемки в РК № 1,2,3, по методу Стейница в РК № 1,2,3.

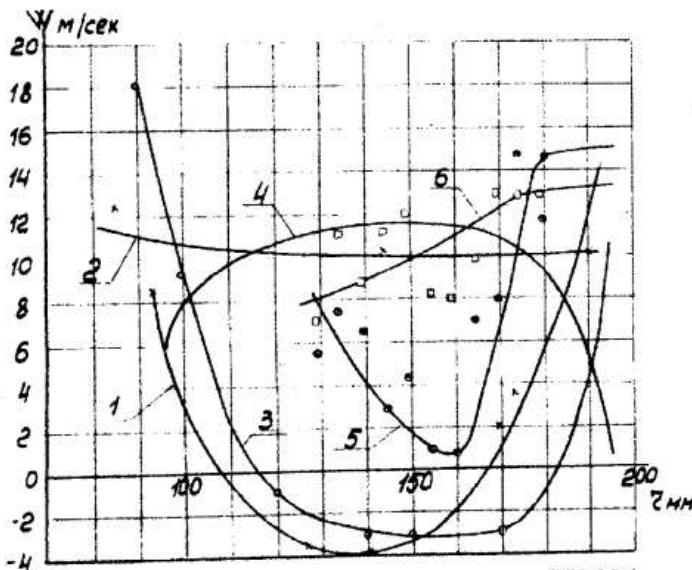


Рисунок 12 - Относительные скорости в РК №1

1,3,5 - для рабочей стороны лопасти; 2,4,6 - для тыльной стороны лопасти;

1,2 - по статическим давлениям; 3,4 - по методу Стейница;

5,6 - по результатам кино съемки

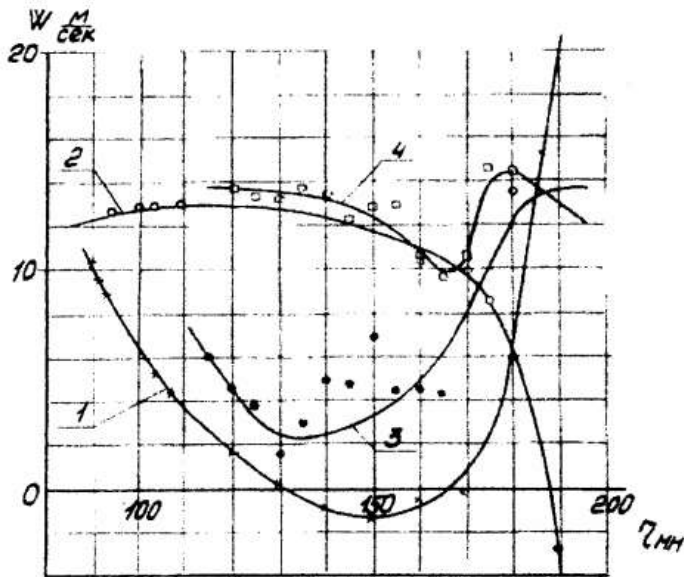


Рисунок 13 - Относительные скорости в РК №2

1,3 – для рабочей стороны лопасти; 2,4 – для тыльной стороны лопасти,
1,2 – по результатам киносъемки; 3,4 – по методу Стейница

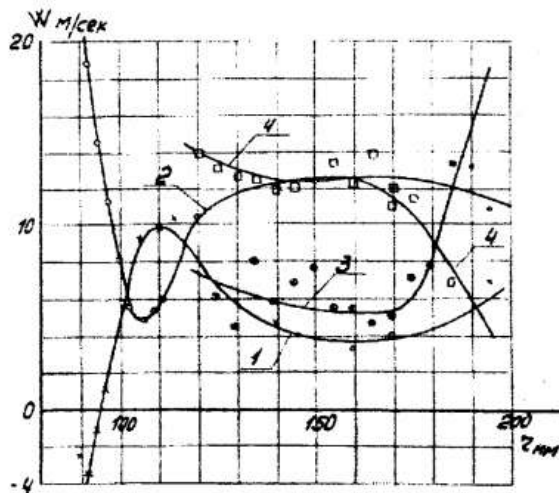


Рисунок 14 - Относительные скорости в РК №3

1,3 – для рабочей стороны лопасти; 2,4 – для тыльной стороны лопасти;
1,2 – по результатам киносъемки; 3,4 – по методу Стейница

У РК № 1,2 на рабочей стороне лопасти получены отрицательные значения относительной скорости, что соответствует представлениям о вторичном потоке, направленном у рабочей поверхности лопасти против основного.

Профилированием проточной части РК №3 устранен вторичный поток.

Наблюдения относительного вихря в РК производились при угловой скорости вращения $\omega=0,6 \text{ сек}^{-1}$ и $0<\omega=104,6 \text{ сек}^{-1}$.

При малой угловой скорости наблюдается относительный вихрь, угловая скорость которого равна угловой скорости РК (рис.15, 16).

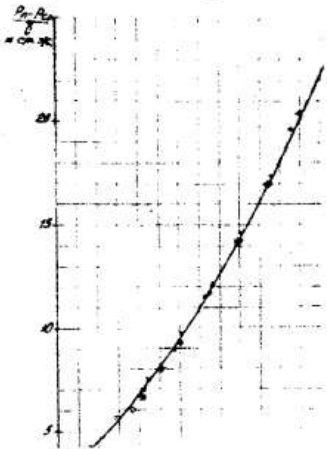


Рисунок 15 - Статические давления на рабочей стороне лопасти (O)
X – ведущий диск, Δ - ведомый диск

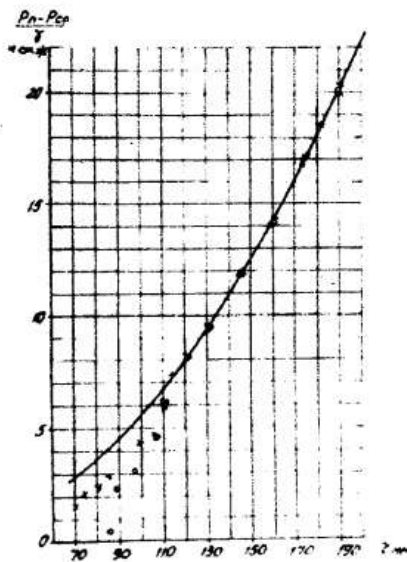


Рисунок 16 - Статические давления на тыльной стороне лопасти (O),
X – ведущий диск,
 Δ - ведомый диск

За время набора оборотов в каналах РК наблюдается относительное движение жидкости, которое быстро исчезает. При $\omega=104,6 \text{ сек}^{-1}$ относительное движение в каналах РК отсутствует. Это подтверждается замерами давлений на поверхности РК.

Зафиксированное отклонение статических давлений на тыльной стороне лопасти от кривой $u^2/2g$ объясняется открытым входом в РК (рис. 6).

На основании приведенных экспериментальных данных сделаны следующие выводы.

При оптимальном расходе наблюдаются признаки, свойственные относительному (осевому) вихрю: скос потока перед выходом из РК, обратное движение жидкости у рабочей стороны лопасти.

При вращении РК с малыми угловыми скоростями наблюдается относительный (осевой) вихрь, угловая скорость которого равна угловой скорости РК, но противоположна по знаку.

С момента начала вращения РК наблюдается относительное движение жидкости в каналах РК, которое с ростом числа оборотов разрушается и исчезает.

Принятая модель движения жидкости в центробежном колесе (поток протекания + относительный вихрь) не объясняет полученные экспериментальные данные.

Для понимания рабочего процесса в РК необходимо привлечь современное представление о жидкостях, в частности, воды [4,5].

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Жаров Г.А. Исследование поля давлений и скоростей в центробежном колесе/ Гидравлические машины, 1968, вып.2, с. 64.
2. Жаров Г.А. Установка для визуальных исследований потока в центробежном колесе// Интенсификация технологических процессов в химической и машиностроительной промышленности. ХОЛПИ им. В.И. Ленина, Харьков, 1971, с. 30.
3. Жаров Г.А. Исследование рабочего процесса в центробежном колесе Отчет арх.№ЩЕ 164-69, рег.№68016873. инв.№60, УкрВНИИГидромаш, Сумы, 1969.
4. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей, АН СССР, 1945.
5. Самойлов О.Я. Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов, АН СССР, М. 1957.