

УДК 621.54:621.43.013.7

UDC 621.54:621.43.013.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ  
ВОДНОЙ И ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ  
В КОНСТРУКЦИИ  
АЭРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО  
ВОДОПОДЪЕМНИКА**

**RESEARCH OF THE TEAMWORK OF WATER  
AND AIR ENVIRONMENT IN THE  
CONSTRUCTION OF THE AEROHYDRAULIC  
WATER LIFT**

Кизюн Жорж Валерьевич  
аспирант

Kizyun Zhorzh Valerevich  
postgraduate student

Островский Николай Вячеславович  
к.т.н., доцент  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Ostrovskiy Nikolay Vyacheslavovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье рассмотрена экспериментальная установка, позволяющая определить физико-механические характеристики воздуха при работе аэрогидравлического водоподъемника. Получены данные о сжимаемости воздуха эффектом «гидравлического сжатия» и сопоставлены с расчетными величинами. Оценена возможность и эффективность использования водо-воздушной напорной системы

In the article, we present the experimental model allowing defining physic and mechanical characteristics of the air at the aérohydraulic water lift. Data of the air compression with the hydraulic compression effect were obtained and compared with calculation sizes. Possibility and efficiency of use of water-air pressure system were estimated

Ключевые слова: АЭРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ВОДОПОДЪЕМНИК, ВОЗДУХ, СЖИМАЕМОСТЬ, ПЛОТНОСТЬ, ДАВЛЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРА, ВЛАЖНОСТЬ

Keywords: AEROHYDRAULIC WATER LIFT, AIR, COMPRESS, DENSITY, PRESSURE, TEMPERATURE, HUMIDITY

В Краснодарском крае рисоводство абсолютно преобладает по объемам водопотребления среди других отраслей сельского хозяйства. Оптимизация водопользования в рисовой отрасли Краснодарского края – одна из значимых составляющих при формировании общего рационального подхода к использованию водных ресурсов в Краснодарском крае [1].

Наряду с качественным распределением и управлением водными ресурсами существует перспективное направление – повторное использование дренажно-сбросных вод, рисовых оросительных систем.

Особого внимания в области повторного использования дренажно-сбросных вод заслуживает внедрение автономных водоподъемников, использующих энергию гидравлического перепада. На кафедре СЭВО Кубанского ГАУ разработан аэрогидравлический водоподъемник (далее

АГВП), предназначенный для возврата части дренажно-сбросного стока на орошение в пределах модуля рисовой системы «Кубанская» [2].

Конструкция аэрогидравлического водоподъемника (рис. 1) обеспечивает создание напора для подъема жидкости с применением аэрогидравлической (воздушно-гидравлической) напорной системы.

Аэрогидравлическая напорная система исключает применение механических силовых элементов для преобразования и передачи энергии гидравлического перепада бьефов. Здесь воздух в «чистом виде» является рабочей средой, обеспечивающей взаимодействие элементов водоподъемника, и непосредственно воздух является своеобразным «поршнем» в напорной системе водоподъёмника.

Работа воздушно-гидравлической напорной системы (см. рис. 1) осуществляется за счет энергии перепада  $Z$ , которая преобразуется в цикл наполнения нижней напорной камеры 1 при помощи поплавкового механизма 2, который клапаном 3 закрывает сбросной патрубок 4, тем самым обеспечивается наполнение. Цикл сброса воды осуществляется поднятием поплавкового механизма 2, закрытием питательного патрубка 5 и открытием сбросного патрубка 4. Циклы набора и сброса воды под напором, обеспечивают гидравлическое сжатие воздуха в нижней напорной камере 1. При наполнении нижней напорной камеры 1 воздух из нее выдавливается по воздуховоду 6 в верхнюю напорную камеру 7, которая наполнена водой через обратный клапан 8 (под силой собственного веса) и вытесняет воду, применительно к рисовой оросительной системе в распределительный канал 9.

Вопросом исследования являются условия совместной работы водной и воздушной среды применительно к данной конструкции. Степень сжатия воздуха является также определяющей составляющей эффективности работы АГВП и, в частности, его КПД.

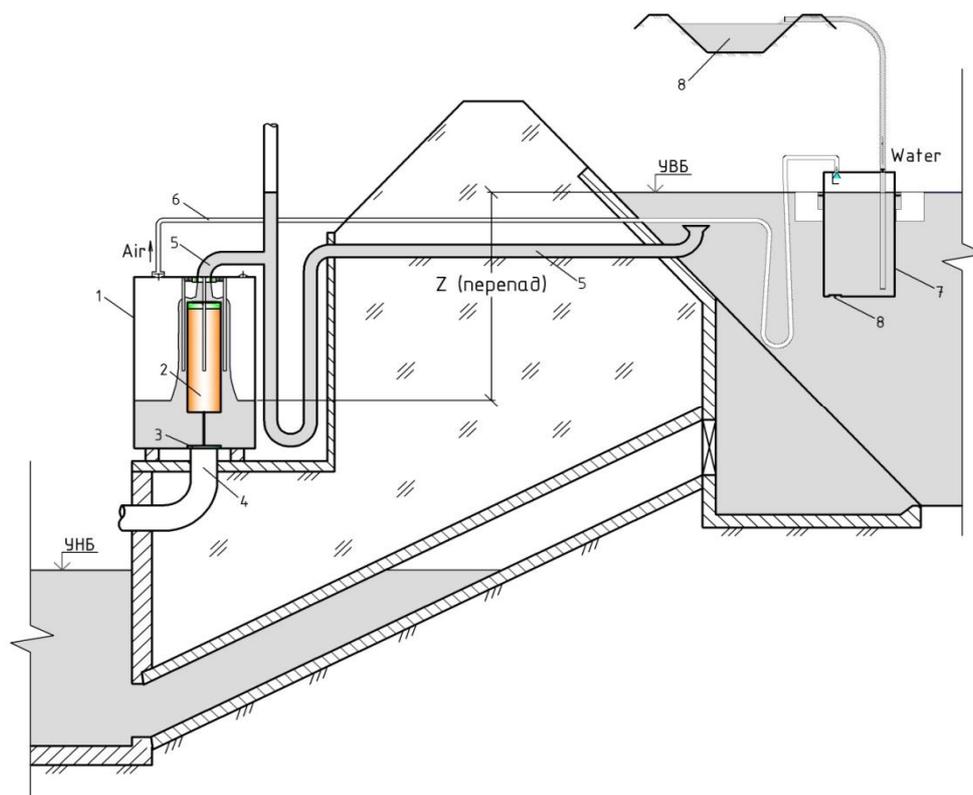


Рисунок 1. Аэрогидравлический водоподъемник АВГП (схема) 1 – нижняя напорная камера; 2 – поплавковый механизм; 3 – клапан; 4 – сбросной патрубок; 5 – питательный патрубок; 6 – воздуховод; 7 – верхняя напорная камера; 8 – распределительный канал

Технические параметры функциональных частей АГВП во многом определяются физическим свойством воздуха – сжимаемостью.

Сжимаемость – это способность вещества изменять свой объём или плотность под действием всестороннего давления или других внешних сил. Способность воздуха сжиматься обусловлена большим расстоянием между молекулами, вследствие чего межмолекулярные силы сцепления малы, поэтому он всегда стремится расшириться и занять весь предоставленный ему объём. Если остановится непосредственно на воздухе, то согласно определению сжимаемости нас интересует изменение его плотности или объёма.

По определению аэрогидравлическая напорная система подразумевает прочный контакт двух сред – воды и воздуха в узлах водоподъемной установки. Поэтому главным вопросом исследования

стало получение данных о сжимаемости воздуха эффектом «гидравлического сжатия» и сопоставление их с расчетными величинами. Исследуемым объектом является воздух и его объемы, плотность при различных давлениях.

Возможность и эффективность использования воздуха в качестве рабочей среды в водо-воздушной напорной системе подтверждена экспериментально. Разработана экспериментальная установка, позволяющая определить физико-механические характеристики воздуха при работе в условиях идентичных конструктивной схеме АГВП и напорному режиму сбросной сети рисовой оросительной системы (рис. 2).

В процессе сжатия воздуха происходит изменение его плотности, следовательно, первоначальным этапом в постановке исследовательской части – это рассмотрение плотности воздуха и факторов, от которых эта плотность зависит. Согласно уравнению состояния идеального газа, плотность воздуха находится по следующей зависимости

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1)$$

где  $p$  – давление Па;  $R$  – газовая постоянная, представляющая собой работу изобарного изменения состояния 1 кг воздуха при изменении температуры на 1<sup>°C</sup>;  $T$  – абсолютная температура, К.

Из уравнения (1) видно, что причиной изменения плотности могут быть следующие факторы:

1) изменение давления:

а) изменение барометрического давления за счет большой разности высот;

б) искусственно создаваемые разности давлений в резервуарах и трубопроводах.

2) перепады температур;

3) изменение состава воздуха;

На изменение давления также оказывают влияние очень большие скорости [3].

Рассмотрим вышеперечисленные факторы и определим приоритетные влияющие факторы для постановки лабораторного эксперимента.

Влияние изменения барометрического давления за счет изменения высоты объекта в случае стационарного эксперимента исключается, т.е. данное влияние можно не учитывать.

Перепады температур сказываются на плотности воздуха в прямой зависимости, т.е. чем значительней перепад, тем значительней изменение плотности. Этот факт должен учитываться при проведении эксперимента, т.е. эксперимент должен протекать изотермически. Так как эксперимент производится в лаборатории, значительные перепады температур исключены, а полученные экспериментальные данные соответствуют фиксированной температуре.

Изменение состава воздуха, согласно [4], состав воздуха по постоянным компонентам мало меняется по высоте до 10 км над любой точкой земной поверхности, за исключением переменных составляющих воздуха это углекислый газ и водяной пар. Содержание углекислого газа настолько мало, что изменение происходит в пределах  $\pm 0,01$  до  $0,03$  от объёма, естественно влияние его на плотность будет еще минимальным. Количество водяного пара в воздухе зависит от метеорологических условий в данный момент (температура, барометрическое давление, скорость ветра), а также от источников испарения. Лабораторные условия эксперимента обеспечивают постоянство в относительной влажности воздуха, поэтому влияние влажности исключается. При этом полученные данные соответствуют фиксированной относительной влажности воздуха.

Влияние скорости движения воздушных масс на плотность сказывается, когда речь идет о больших скоростях, порядка величины скорости звука [3].

В случае, когда воздушные массы находятся практически в статическом состоянии, так как система находится в замкнутом состоянии или положении постепенного наполнения, т.е. нет условий для развития больших скоростей вытекания или перемещения, изменением плотности за счет скоростной составляющей можно пренебречь.

Таким образом, среди значительных влияющих факторов, которые необходимо учитывать при экспериментальном определении коэффициента сжатия  $k_{сж}$ , выделим температуру и влажность воздуха.

С целью получения данных о степени сжатия воздуха при «гидравлическом» сжатии был выполнен лабораторный эксперимент.

При экспериментальном изучении коэффициент сжатия определен путем изменения объема в камере давления. Такой метод выбран не случайно, а как наиболее соответствующий конструктивным особенностям аэрогидравлического водоподъемника, для обоснования параметров которого выполнен эксперимент при постоянной влажности и температуре воздуха в помещении.

При подходе к конструированию экспериментальной модели учитывалась возможность создания давления от 0,0 кПа до 160 кПа. Обязательным требованием к экспериментальному диапазону давлений является охват диапазона рабочего давления, имеющего место в условиях рисовой оросительной системы при работе АГВП. С учетом всех вышеперечисленных требований и условий была сконструирована экспериментальная установка для изучения сжимаемости воздуха в условиях, которые схожи с работой АГВП (см. рис. 2).

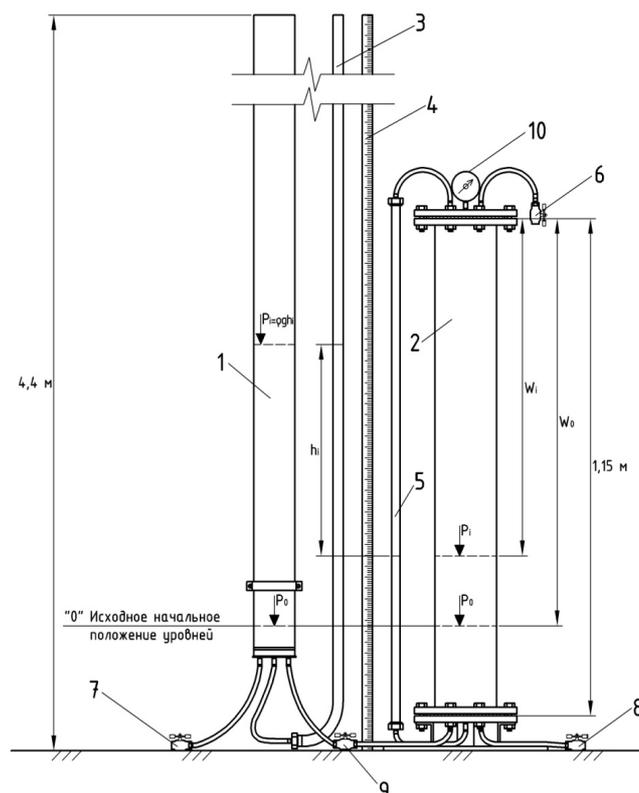


Рисунок 2. Экспериментальный стенд по определению коэффициента сжатия: 1 – напорная емкость; 2 – камера давления; 3 – пьезометр; 4 – мерная лента; 5 – мерное стекло, камеры давления; 6 – задвижка подачи воздуха; 7 – задвижка для подачи воды в напорную ёмкость; 8 – задвижка для спуска воды; 9 – задвижка для подачи воды в камеру давления; 10 – манометр

В напорную емкость 1 подается вода через задвижку 7. Отметка поверхности воды напорной ёмкости 1 отслеживается по пьезометру 3 и мерной ленте 4. В камеру давления 2 через задвижку 9 вода поступает под давлением из напорной емкости 1. Камера давления 2 имеет сообщение с атмосферой через задвижку 6, через которую в открытом положении проходит воздух и занимает весь предоставленный ему объём, в закрытом положении представляет собой герметичную камеру. Камера 2 также оснащена задвижкой для спуска воды 8 и мерным стеклом 5. Мерная лента 4 предназначена для снятия показаний уровня воды в напорной ёмкости 1 и камере давления 2, соответственно по пьезометру 3 и мерному стеклу 5.

Принцип действия установки поясняется также рисунком 2.

Фото экспериментальной установки показано на рисунке 3



Рисунок 3. Фото экспериментальной установки по определению коэффициента сжатия

Определение степени сжатия воздуха осуществляется при сжатии известного объёма воздуха в камере давления. Камера давления 2 наполняется воздухом при атмосферном давлении  $P_0$  через задвижку 6, которая затем закрывается и осуществляется сжатие воздуха. Происходит так называемое «гидравлическое сжатие» за счет давления столба жидкости в емкости 1 высотой  $h$ . В этом случае исключаются потери на трение при сжатии. Применяется основное уравнение гидростатики:

$$p = p_0 + \gamma \cdot h, \quad (2)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление;  $\gamma$  – удельный вес воды;  $h$  – высота столба жидкости.

Применительно к лабораторной установке интерес представляет избыточное давление, которое показывает превышение полного давления над атмосферным давлением:

$$p_{изб} = P_i = \gamma \cdot h_i \quad (3)$$

где  $P_i$  –пьезометрическое давление,  $\gamma$  – удельный вес воды;  $h_i$  – фиксируемая разность отметок уровня в напорной ёмкости и камере давления.

Согласно уравнению (3) для вычисления создаваемого давления учитываются два параметра: высота столба воды  $h_i$  и удельный вес воды  $\gamma$ .

Удельный вес воды равен  $\gamma = \rho \cdot g$ , зависит от её плотности, которая изменяется в зависимости от температуры воды. Поэтому выполнялась четкая фиксация температуры воды при подаче её в напорную ёмкость, контролем был замер температуры при спуске её из напорной ёмкости в конце опыта.

Высота столба жидкости  $h_i$  (есть разность отметок уровней в напорной ёмкости и камере давления, которая вычисляется по мерной ленте) и определяет величину давления в камере давления. Рабочий диапазон напорной ёмкости позволяет задавать значения  $h_i$  от 0,4 до 4,4 м. В рабочем диапазоне выполнялось 9 статических измерений.

Методика эксперимента:

- 1) начальное положение: открытие задвижки между напорной ёмкостью и камерой давления, которая имеет сообщение с атмосферой (открыта задвижка б), и выставление общего уровня воды на фиксированной отметке в напорной ёмкости и камере давления.
- 2) закрытие задвижки камеры давления б, момент нулевого напора и свободное состояние воздуха.
- 3) подача воды в напорную ёмкость и создание в напорной ёмкости столба жидкости высотой 0,5 м от начального уровня. Фиксация отметки уровня воды в камере давления, расчет  $h_i$  и объёма воздуха.

- 4) последовательное увеличение столба жидкости в напорной ёмкости с шагом 0,5 м от предыдущего значения и фиксация соответствующих  $h_i$  и объемов воздуха, во всем рабочем диапазоне напорной ёмкости.
- 5) сброс воды из напорной ёмкости на начальную фиксированную отметку и сравнение объёма воздуха в камере давления с начальным объёмом.

Измерения, как указано выше, проводились во всем рабочем диапазоне напорной ёмкости с произвольным шагом напора, в пятикратной повторности, результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Показания пьезометра экспериментальной установки определяют величину напора ( $h_i$ ) и соответственно давление ( $P_i$ ). Текущие значения  $h_i$  и соответствующие им объёмы воздуха в камере давления ( $W_i$ ) – есть средние значения из пяти выполненных измерений. При каждом измерении учтен дополнительный объём воздуха в мерном стекле и фитинговых соединениях экспериментальной установки ( $W_{i, \text{доп. фит.}}$ ). Коэффициент сжатия определен по зависимости:

$$k_{\text{сж}} = \frac{W_i + W_{i \text{ доп. фит.}}}{W_0 + W_{0 \text{ доп. фит.}}} \quad (4)$$

Таблица 1 – Экспериментальное определение коэффициента сжатия воздуха при контроле пьезометром

№	$h_i$ , см	$P_i$ , Па	$W_0$ , м <sup>3</sup>	$W_{i \text{ доп. фит.}}$	$W_i$ , м <sup>3</sup>	$k_{\text{сж. экс}}$
1	0	0	0,013019	0,000170	0,013019	1
2	27,3	2675,37		0,000169	0,012635	0,971
3	74,11	7258,55		0,000166	0,012085	0,929
4	121,1	11859,56		0,000162	0,011586	0,891
5	168,1	16459,32		0,000159	0,011127	0,856
6	215,7	21125,82		0,000156	0,010695	0,823
7	262,9	25752,40		0,000153	0,010292	0,792
8	310,9	30460,38		0,000150	0,009918	0,763
9	337,2	33022,29		0,000148	0,009726	0,749

По результатам эксперимента построен график сжимаемости воздуха, который представлен на рисунке 4

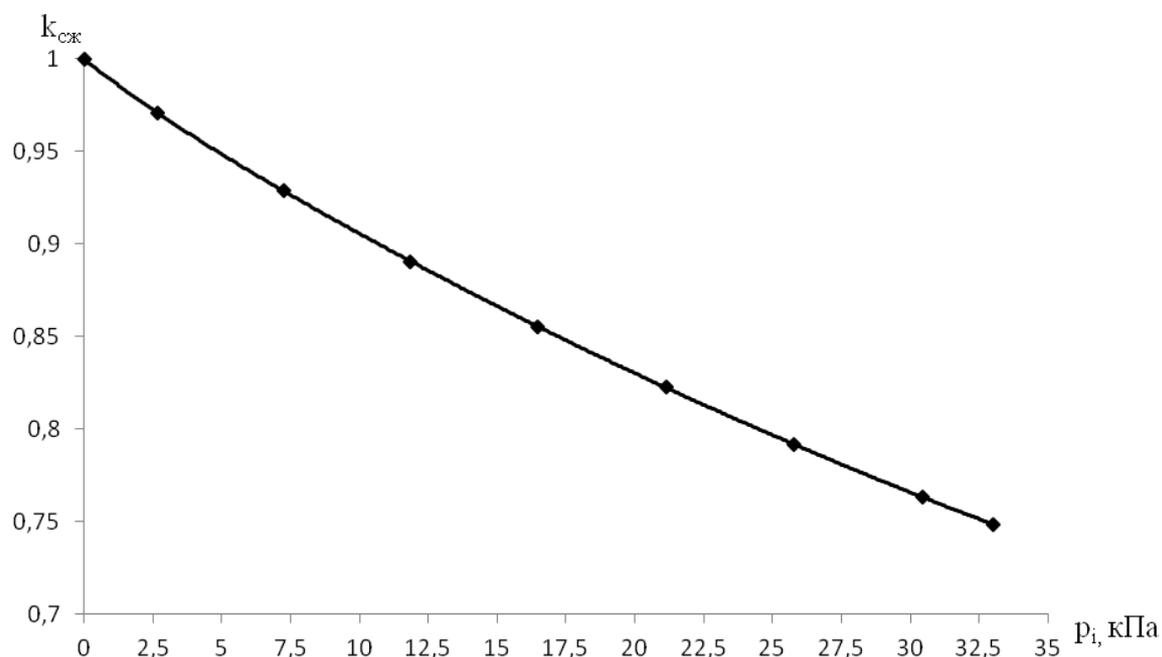


Рисунок 4. Коэффициент сжатия воздуха (экспериментальная зависимость)

Для обеспечения контроля проведенных измерений, а также изучения значений  $k_{сж}$  в более широком диапазоне давлений (0–160 кПа), эксперимент выполнен с измерением действующего давления, при помощи манометра. В ходе эксперимента также осуществлялось «гидравлическое сжатие» воздуха. Вода под напором подавалась в камеру давления по патрубку через задвижку 8. При этом доступ воздуха в камеру давления исключался. Значение создаваемого давления фиксировалось по показаниям манометра 10, расположенного в верхней части камеры давления. Достоверность показаний манометра подтверждается результатами периодической проверки.

Эксперимент выполнен в пятикратной повторности. Значения коэффициента сжатия рассчитаны по формуле (4).

На рисунке 5 также выполнено совмещение графиков  $k_{сж}$  по данным таблицы 1 и таблицы 2.

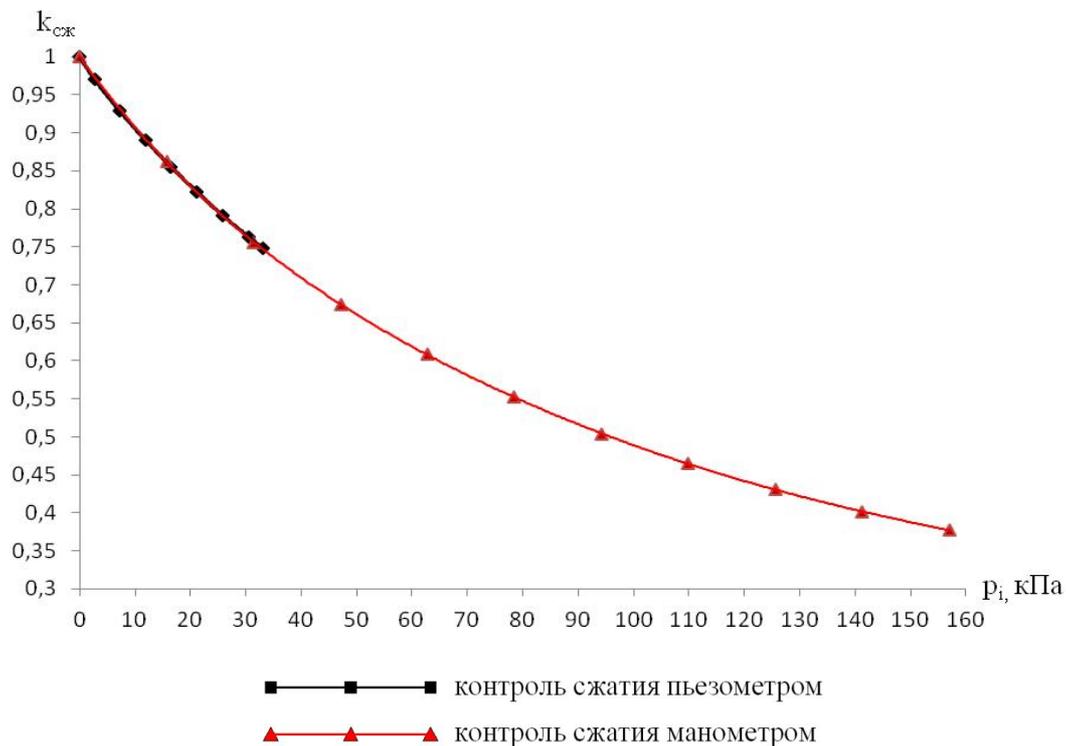


Рисунок 5. Совмещенный экспериментальный график коэффициента сжимаемости воздуха

Таблица 2 – Экспериментальное определение коэффициента сжатия воздуха при контроле манометром

№	$P_i$ , Па	$W_0$ , м <sup>3</sup>	$W_i$ доп.фит. м <sup>3</sup>	$W_i$ , м <sup>3</sup>	$k_{сж.экс}$
1	0	0,013019	0,00017	0,013019	1
2	15696		0,000158	0,0112099	0,862
3	31392		0,000148	0,009827	0,756
4	47088		0,000141	0,008756	0,675
5	62784		0,000135	0,007888	0,608
6	78480		0,00013	0,007156	0,552
7	94176		0,000126	0,006521	0,504
8	109872		0,000122	0,006009	0,465
9	125568		0,000119	0,005563	0,431
10	141264		0,000117	0,005181	0,402
11	156960		0,000115	0,004858	0,377

Отмечается совпадение результатов, при измерении действующего давления пьезометром и манометром. Это позволяет нам получить и использовать в дальнейших расчетах математическое уравнение кривой коэффициента сжатия  $k_{сж} = f(P)$

$$k_{сж} = - 1,3 \cdot 10^{-16}x^3 + 5,2 \cdot 10^{-11}x^2 - 9 \cdot 10^{-6}x + 0,9 \quad (5)$$

При работе АГВП в производственных условиях добиться статического значения влажности и температуры не предоставляется возможным.

Влажность и температура будут меняться в течение суток и в течение вегетационного периода, согласно климатическим условиям района. Выполним теоретическое исследование и оценим степень влияния климатических факторов (температура, влажность) на величину коэффициента сжатия атмосферного воздуха.

Когда речь идет о влажном воздухе, подразумевают смесь сухого воздуха и водяного пара.

Давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара, что подтверждается законом Дальтона или законом парциальных давлений.

В связи с этим возникает задача установить степень влияния влажности и температуры воздуха на величину  $k_{сж}$

Рассмотрим коэффициент сжатия как отношения плотности влажного воздуха при атмосферном давлении (что соответствует  $W_0$ ) и плотность этого воздуха в сжатом состоянии (аналогично состоянию сжатого воздуха при воздействии на него некоторого давления в лабораторной установке):

$$k_{сж} = \frac{\rho_{сж}}{\rho_{атм}} \quad (6)$$

Плотность влажного воздуха, т.е. как сумма сухого воздуха и водяного пара при различной влажности и температуре определяется по формуле [3]:

$$\rho = \frac{p(1+d)}{0,287 \cdot T(1+1,6078d)} \quad (7)$$

где  $p$  – давление воздуха, кПа;  $d$  – влагосодержание влажного воздуха, г/кг;  $T$  – абсолютная температура воздуха, К.

С использованием формулы (7) нами рассчитан коэффициент сжатия для некоторого диапазона температур, характерных для вегетационного периода Краснодарского края при различной относительной влажности воздуха.

Результаты расчета показаны в таблице 3.

Анализ коэффициента сжатия при различной относительной влажности воздуха, ссылаясь на полученные данные из таблицы 3, показал, что при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , характерной средней температуре воздуха за вегетационный период, предполагаемом рабочем давлении  $P_{\text{изб}} = 2$  м вод.ст. и относительной влажности воздуха  $\varphi_1 = 30\%$ ,  $\varphi_2 = 90\%$ , соответствует плотность  $\rho_1 = 1,434$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_2 = 1,4277$  кг/м<sup>3</sup>. Разница между плотностью воздуха составляет всего 0,0063, с разницей в значениях относительной влажности 60%. Из этого следует, что разница между сжимаемостью воздуха с большей и меньшей относительной влажностью воздуха, будет еще меньше.

Таблица 3 – Определение величины коэффициента сжатия воздуха, при различной температуре и относительной влажности воздуха

t, °C	φ, %	Р <sub>изб 0</sub> = 0 м.вод.ст.		Р <sub>изб 1</sub> = 0,5 м.вод.ст.		Р <sub>изб 2</sub> = 1 м.вод.ст.		Р <sub>изб 3</sub> = 2 м.вод.ст.		Р <sub>изб 4</sub> = 3 м.вод.ст.		Р <sub>изб 5</sub> = 4 м.вод.ст.		Р <sub>изб 6</sub> = 5 м.вод.ст.	
		Р <sub>атм</sub> = 101,3 кПа		Р <sub>1</sub> = 106,203 кПа		Р <sub>2</sub> = 111,107 кПа		Р <sub>3</sub> = 120,913 кПа		Р <sub>4</sub> = 130,72 кПа		Р <sub>5</sub> = 140,527 кПа		Р <sub>6</sub> = 150,333 кПа	
		ρ, кг/м <sup>3</sup>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	к <sub>сж</sub>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	к <sub>сж</sub>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	к <sub>сж</sub>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	к <sub>сж</sub>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	к <sub>сж</sub>	ρ, кг/м <sup>3</sup>	к <sub>сж</sub>	ρ, кг/м <sup>3</sup>
5	30	1,26773	1,32914	0,9538	1,39057	0,9117	1,51341	0,8377	1,63626	0,7748	1,75911	0,7207	1,88195	0,6736	
	60	1,26649	1,32790	0,9538	1,38933	0,9116	1,51217	0,8375	1,63502	0,7746	1,75787	0,7205	1,88071	0,6734	
	90	1,26526	1,32666	0,9537	1,38810	0,9115	1,51093	0,8374	1,63378	0,7744	1,75663	0,7203	1,87947	0,6732	
10	30	1,24485	1,30518	0,9054	1,36552	0,9116	1,48619	0,8376	1,60687	0,7747	1,72755	0,7206	1,84822	0,6735	
	60	1,24314	1,30346	0,9537	1,36381	0,9115	1,48448	0,8374	1,60516	0,7745	1,72584	0,7203	1,84651	0,6732	
	90	1,24143	1,30175	0,9537	1,36210	0,9114	1,48276	0,8372	1,60345	0,7742	1,72413	0,7200	1,84479	0,6729	
15	30	1,22259	1,28187	0,9538	1,34117	0,9116	1,45975	0,8375	1,57833	0,7746	1,69692	0,7205	1,81550	0,6734	
	60	1,22026	1,27954	0,9537	1,33884	0,9114	1,45741	0,8373	1,57600	0,7743	1,69458	0,7201	1,81316	0,6730	
	90	1,21792	1,27720	0,9536	1,33650	0,9113	1,45507	0,8370	1,57366	0,7739	1,69225	0,7197	1,81082	0,6726	
20	30	1,20089	1,25916	0,9537	1,31744	0,9115	1,43400	0,8374	1,55056	0,7745	1,66712	0,7203	1,78368	0,6733	
	60	1,19774	1,25601	0,9536	1,31429	0,9113	1,43085	0,8371	1,54741	0,7740	1,66397	0,7198	1,78053	0,6727	
	90	1,19459	1,25286	0,9535	1,31114	0,9111	1,42770	0,8367	1,54426	0,7736	1,66082	0,7193	1,77738	0,6721	
25	30	1,17965	1,23694	0,9537	1,29425	0,9115	1,40885	0,8373	1,52346	0,7743	1,63807	0,7201	1,75267	0,6731	
	60	1,17546	1,23274	0,9535	1,29006	0,9112	1,40465	0,8368	1,51926	0,7737	1,63387	0,7194	1,74847	0,6723	
	90	1,17126	1,22855	0,9534	1,28586	0,9109	1,40046	0,8363	1,51507	0,7731	1,62967	0,7187	1,74427	0,6715	
30	30	1,15879	1,21514	0,9536	1,27150	0,9114	1,38421	0,8371	1,49693	0,7741	1,60965	0,7199	1,72236	0,6728	
	60	1,15327	1,20961	0,9534	1,26597	0,9110	1,37868	0,8365	1,49140	0,7733	1,60412	0,7189	1,71683	0,6717	
	90	1,14774	1,20408	0,9532	1,26044	0,9106	1,37315	0,8358	1,48587	0,7724	1,59859	0,7180	1,71130	0,6707	
35	30	1,13822	1,19365	0,9536	1,24910	0,9112	1,35998	0,8369	1,47087	0,7738	1,58176	0,7196	1,69264	0,6725	
	60	1,13101	1,18644	0,9533	1,24189	0,9107	1,35277	0,8361	1,46366	0,7727	1,57455	0,7183	1,68543	0,6711	
	90	1,1238	1,17923	0,9530	1,23468	0,9102	1,34556	0,8352	1,45645	0,7716	1,56734	0,7170	1,67822	0,6696	
40	30	1,11784	1,17238	0,9535	1,22695	0,9111	1,33605	0,8367	1,44517	0,7735	1,55429	0,7192	1,66340	0,6720	
	60	1,10853	1,16307	0,9531	1,21764	0,9104	1,32675	0,8355	1,43587	0,7720	1,54499	0,7175	1,65409	0,6702	
	90	1,09922	1,15377	0,9527	1,20833	0,9097	1,31744	0,8344	1,42656	0,7705	1,53568	0,7158	1,64479	0,6683	

Таким образом, влажность воздуха практически не оказывает влияния на величину  $k_{сж}$ . Используя таблицу 3, можно проанализировать влияние температуры на коэффициент сжатия воздуха. Взяв значения плотности с давлением  $P_{изб} = 2$  м вод. ст. и относительной влажностью 60 %, что примерно равно средней по Краснодарскому краю, для температуры  $t_1 = 5$  °C и  $t_2 = 40$  °C,  $\rho_1 = 1,51217$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_2 = 1,32675$  кг/м<sup>3</sup>. Разница между плотностями с разностью температур 35 °C равна 0,18542, а разница между соответствующими коэффициентами сжатия  $k_{сж.1} = 0,8375$  и  $k_{сж.2} = 0,8344$ , составляет 0,0031. Таким образом, влияние температуры не оказывает значительных изменений на величину коэффициента сжатия.

Для проверки применимости формулы 7 определим по ней значения  $k_{сж}$ , соответственно фиксированным точкам избыточного давления экспериментальной части и сопоставим результаты расчета с соответствующими значениями  $k_{сж}$ , полученными на лабораторной установке.

Четыре точки избыточного давления  $p_1 = 0$  Па;  $p_2 = 15696$  Па;  $p_3 = 31392$  Па;  $p_4 = 47088$  Па;

Температура, при которой была проведена экспериментальная часть  $t_1 = 16$  °C, относительная влажность воздуха – полученное значение  $\varphi_1 = 55$  %

При температуре  $t_1 = 16$  °C и относительной влажности  $\varphi_1 = 55$  %, для всего ряда давлений  $p_1$ ;  $p_2$ ;  $p_3$ ;  $p_4$  по формуле определяем влагосодержание влажного воздуха г/кг [3,4]:

$$d = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_{н.п.}}{p - \varphi \cdot p_{н.п.}} \quad (8)$$

где  $p_{н.п.}$  – парциальное давление насыщенного пара, кПа;  $p$  – давление воздуха, всей смеси, кПа.

С использованием формул (7, 8) рассчитаем для каждого значения  $p_i$ , соответствующие плотность и влагосодержание. По полученным значениям плотности найдем коэффициент сжатия  $k_{сж. i}$ .

Результаты расчета показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетное определение коэффициента сжатия при условиях экспериментальной части

$p_i$ , кПа	$d_i$ , г/кг	$\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup>	$k_{сж. i}$
0	0,006197	1,2159	1
15696	0,005359	1,4050	0,86541
31392	0,00472	1,5941	0,76275
47088	0,004217	1,7832	0,68186
62784	0,003811	1,9727	0,61636

Сопоставим расчетные коэффициенты сжатия с коэффициентами сжатия, полученными в экспериментальной части и определим процентное отклонение:

$$\sigma_i = \frac{\Delta_i}{k_{сж. i}} 100\% \quad (9)$$

где  $\Delta_i$  – разность значений расчетного и экспериментального коэффициента сжатия  $k_{сж. i} - k_{сж. экс. i}$ ;  $k_{сж. i}$  – расчетный коэффициент сжатия.

Расчет представлен в таблице 5

Таблица 5 – Процентное отклонение экспериментальных и расчетных коэффициентов сжатия

$k_{сж. i}$	0,86541	0,76275	0,68186	0,61636
$k_{сж. экс. i}$	0,862	0,756	0,675	0,608
$\sigma_i, \%$	0,50478	1,03968	1,36458	1,6997

Анализ соответствующих значений расчетных и экспериментальных коэффициентов сжатия показывает, что разница между ними не превышает 2 %. При этом можно сослаться на погрешность при снятии показаний с

приборов и непосредственно погрешность самого прибора. Следовательно зависимости (7, 8) применимы для расчетов  $k_{сж}$ .

В заключение, сведя экспериментальные данные с расчетными, можно проанализировать КПД аэрогидравлического водоподъемника.

Под КПД аэрогидравлического водоподъемника следует понимать отношение использованной энергии воды к затраченной. В нашем случае это объем и напор, поэтому КПД можно выразить формулой [5]:

$$\eta = \frac{V_1 h_{наг}}{V h} \quad (10)$$

где  $V_1$  – объем воды вытесненный АГВП за цикл;  $h_{наг}$  – напор вытеснения АГВП;  $V$  – объем воды сброшенный АГВП;  $h$  – рабочий напор на АГВП.

Определив формулу для определения КПД, можно произвести расчет для первого приближения. Так, задавшись рабочим напором = 2 м, при котором предполагается работа АГВП и учитывая потери, которые при проектировании не должны превышать 0,4 м, нагнетательный напор = 1,6 м. Средняя температура за вегетационный период составляла 20 °С и относительная влажность воздуха – 60 %. Предположив, что за цикл через АГВП пройдет объём воды  $V_{сб} = 100$  литров, с учетом коэффициента сжатия при  $k_{сж} = 0,8371$ . Тогда объем воды, которой будет вытеснен, равен  $V_1 = 100 \cdot 0,8371 = 83,7$  литров. Итого за цикл работы АГВП сбрасывается объем  $V_1 = 100$  литров, при этом подается объем  $V_1 = 83,7$  литров. Таким образом, КПД составит:

$$\eta = \frac{83,7 \cdot 1,6}{100 \cdot 2} = 0,67$$

Однако стоит отметить, что данный расчет выполнен в первом приближении, без дополнительных поправок.

### Выводы

1. Разработана экспериментальная установка, максимально приближенная по конструкции к условиям работы аэрогидравлического водоподъемника на оросительной системе с целью изучения коэффициента сжатия  $k_{сж}$  атмосферного воздуха.

2. Экспериментальные исследования позволили проанализировать процесс сжатия, воздуха в условиях аналогичных напорной системе аэрогидравлического водоподъемника, установить факторы, которые влияют на процесс сжатия и величину их воздействия.

3. Несмотря на то, что сжатие воздуха может быть вызвано чрезвычайно малыми силами, сама величина сжатия достаточно небольшая и зависит в большей степени уровня рабочего давления.

4. Экспериментальные исследования помогли с уверенностью сказать о возможности использования воздуха как энергоносителя в напорной системе аэрогидравлического водоподъемника.

5. Определен  $k_{сж}$  по показаниям пьезометра в рабочем диапазоне давлений, характерном для аэрогидравлического водоподъемника, выполнен контроль  $k_{сж}$  по показаниям манометра и рассмотрен диапазон экспериментальных значений  $k_{сж}$ .

6. По известным теоретическим зависимостям  $k_{сж}$  рассчитан с учетом особенностей климатической зоны Краснодарского края.

7. Отмечено хорошее совпадение  $k_{сж}$  по результатам расчетов и экспериментальной установки, что позволяет использовать полученные математические зависимости  $k_{сж} = f(P)$  при разработке методики расчета параметров аэрогидравлического водоподъемника.

8. Выполненные исследования позволили в первом приближении установить КПД аэрогидравлического водоподъемника, который составил 0,67.

### Список литературы

1. Островский В.Т., Островский Н.В., Кизюн Ж.В. Оптимизация водопользования в рисовой отрасли в основе рационального подхода к использованию водных ресурсов в Краснодарском крае // Материалы научно-практической конференции, посвященной 50-летию Кубанского бассейнового водного управления «Управление водными ресурсами: рациональное использование, охрана безопасности». – Краснодар, 2012.– 160 с.
2. Кизюн Ж.В., Островский Н.В. Об актуальности автономных водоподъемников на рисовых системах Низовья реки Кубань // Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем: Материалы Международной научно практической конференции. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. Т. 1. – 516 с.
3. Кузнецов Ю.В., Кузнецов М.Ю. Сжатый воздух. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: ЮрО РАН, 2007. – 511 с.
4. Карабин А.И. Сжатый воздух. М.: Машиностроение, 1964 – 343 с.
5. Овсепян В.М. Гидравлический таран и таранные установки. М.: Машиностроение, 1968 – 124 с.

### References

1. Ostrovskij V.T., Ostrovskij N.V., Kizjun Zh.V. Optimizacija vodopol'zovanija v risovoj otrasli v osnove racional'nogo podhoda k ispol'zovaniju vodnyh resursov v Krasnodarskom krae // Materialy nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 50-letiju Kubanskogo bassejnovogo vodnogo upravlenija «Upravlenie vodnymi resursami: racional'noe ispol'zovanii, ohrana bezopasnost'». – Krasnodar, 2012.– 160 s.
2. Kizjun Zh.V., Ostrovskij N.V. Ob aktual'nosti avtonomnyh vodopod#emnikov na risovyh sistemah Nizov'ja reki Kuban' // Agrarnaja nauka – osnova uspešnogo razvitija APK i sohraneniya jekosistem: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoj konferencii. – Volgograd: FGBOU VPO Volgogradskij GAU, 2012. T. 1. – 516 s.
3. Kuznecov Ju.V., Kuznecov M.Ju. Szhatyj vozduh. 2-e izd., pererab. i dop. Ekaterinburg: JurO RAN, 2007. – 511 s.
4. Karabin A.I. Szhatyj vozduh. M.: Mashinostroenie, 1964 – 343 s.
5. Ovsepjan V.M. Gidravlicheskiy taran i tarannye ustanovki. M.: Mashinostroenie, 1968 – 124 s.