

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ

---

Д. М. АПТЕР

*На правах рукописи*

Исследование гидродинамики  
твердых реагирующих частиц  
методом скоростной киносъемки

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель член-корреспондент  
АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

Иркутск  
1961

186926

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР

Движение твердых как реагирующих, так и инертных частиц в газе описывается в настоящее время одними и теми же законами. Поэтому расчет аппаратов и процессов с реагирующимися твердыми частицами производят в предположении, что частицы инертны, а поправки вводятся лишь в том случае, если есть массообмен. Между тем, в последние годы в связи с исключительно широким применением новых аппаратов, в которых протекают различные процессы с твердыми частицами во время их транспортировки газовым потоком, накопилось большое количество данных о том, что полет этих частиц, претерпевающих физико-химические превращения, не только не подчиняется законам движения инертных тел, но и не описывается полностью формальными уравнениями массообмена, выведенными из математической теории движения точки переменной массы. Это объясняется тем, что эта теория не принимает во внимание то изменение характера обтекания тела потоком, которое обусловлено реагированием частицы с окружающей средой или фактом разложения вещества частицы с выделением тех или иных газообразных продуктов.

Совершенно очевидно, что движение частиц существенно влияет не только на интенсивность ряда технологических процессов, но иногда и на направление протекающих в частицах реакций и явлений. Вот почему исследования, направленные на выяснение законов движения реагирующих частиц, приобретают сейчас все большую актуальность, в то же время в этой области до сих пор сделано еще очень мало, о чем свидетельствует ничтожное количество публикаций на эту тему как в отечественной, так и в иностранной литературе. Можно лишь назвать работы Л. Н. Хитрина, З. И. Леонть-

евой, Б. Н. Басова и В. А. Попова, а также В. И. Бабия и И. П. Ивановой и некоторых других, где излагались результаты изучения влияния <sup>горения</sup> угольных частиц на их движение в газозвеси. Несмотря на оригинальность и точность работ этих авторов еще многие вопросы остались неясными, так как решить эту проблему в целом может лишь труд большого коллектива исследователей.

В данной работе представлены результаты исследования более узкого вопроса, который еще совершенно не освещался в литературе—влияние реакций и процессов, сопровождающих термическое разложение частиц каменного угля, на их движение в газовом теплоносителе, определение характера и количественных величин отклонений в гидродинамике подобных частиц и выяснение физической сущности протекающих при этом явлений. Путем специального моделирования изучался не только общий характер движения угольных частиц, подвергающихся термическому разложению, но и влияние на это движение как термических эффектов при экзо- и эндотермических реакциях, так и процессов газовой выделенности. В этих исследованиях применялась высокоскоростная киносъемка, которая позволяла с высокой точностью определять скорость движения частиц в любой точке их траектории и в некоторых случаях—наблюдать картину обтекания реагирующих частиц окружающей их средой. В результате проведенной работы выяснены следующие закономерности движения твердых реагирующих частиц.

### 1. Движение угольных шаров, подвергающихся термическому разложению

При термическом разложении угля в нем протекают процессы, способные изменить гидродинамику движущейся угольной частицы. При нагревании этих частиц из них сначала удаляется влага, потом проходят реакции, сопровождающиеся поглощением или выделением тепла, а сами частицы изменяют форму и размеры. Разложение угольного вещества сопровождается массообменом в связи с бурным выделением газов и паров. Все перечисленные явления влияют на полет частиц в потоке, и они перестают двигаться так, как инертные тела.

Для подтверждения этого был проведен ряд опытов, в которых наблюдалось падение угольных сфер в противотоке перегретого пара. Установка для исследования состояла из прозрачной кварцевой трубки с внутренним диаметром 31,5 мм и длиной 1100 мм, которая помещалась в непрозрачный кожух с вертикальным вырезом, куда закреплялась сантиметровая шкала. Трубка освещалась лампой дневного света, установленной позади нее в том же корпусе. В кварцевую трубку снизу через успокоительно-выравнивающую решетку подавался перегретый пар, температура которого измерялась термопарой в центре трубки и записывалась потенциометром. В верхнюю часть установки в момент опыта вставлялся специальный питатель, позволяющий равномерно подавать 30—40 угольных шариков в среду перегретого пара.

Угольные шарики приготавливались из обогащенной пыли (200 меш) каменного угля Новометелкинского месторождения Иркутского бассейна, которая закатывалась на воде гранулятором в неправильные сферы со средним диаметром 6—8 мм.

Работы, проведенные в отделе энергетики ВСФ СО АН СССР, показали, что окомкованное таким образом топливо не претерпевает существенных объемных изменений при самом жестком способе его нагрева. Поэтому данный способ приготовления образцов для опытов позволил не учитывать влияние изменения формы или размеров частиц на их движение в теплоносителе, то есть исключить такую задачу, которая является весьма сложной ввиду неопределенности динамики изменения сечения миделя в реальных угольных частицах. После высушивания гранулы вручную тщательно обрабатывались специальным инструментом до получения правильной сферической формы с диаметром 5 мм. Следующая за этим отбраковка позволила оставить для опытов лишь те шары, у которых отклонения по диаметру не превышали 0,18%, а по весу—0,6%.

Испытываемые шарики свободно падали в перегретом паре и, пройдя через успокоительно-выравнивающую решетку, попадали в колбу-приемник, заполненную водой для предотвращения дальнейшего термического разложения угля. Технический анализ вещества шариков после опытов показал, что уголь превращается в

полукокс с различной степенью термической деструкции угольного вещества. Температура в опытах изменялась через  $100^\circ$  от  $300$  до  $825^\circ\text{C}$ .

Падение шаров фотографировалось кинокамерой со скоростью до 4000 кадров в секунду на участке 25—30 см, расположенном в нижней части установки. Благодаря большому удалению фотографируемого участка пути от начала падения (80 см) и встречному потоку пара, движение шариков было равномерным. Скорость падения определялась расшифровкой киноплёнки, а коэффициент гидродинамического сопротивления вычислялся по известным формулам.

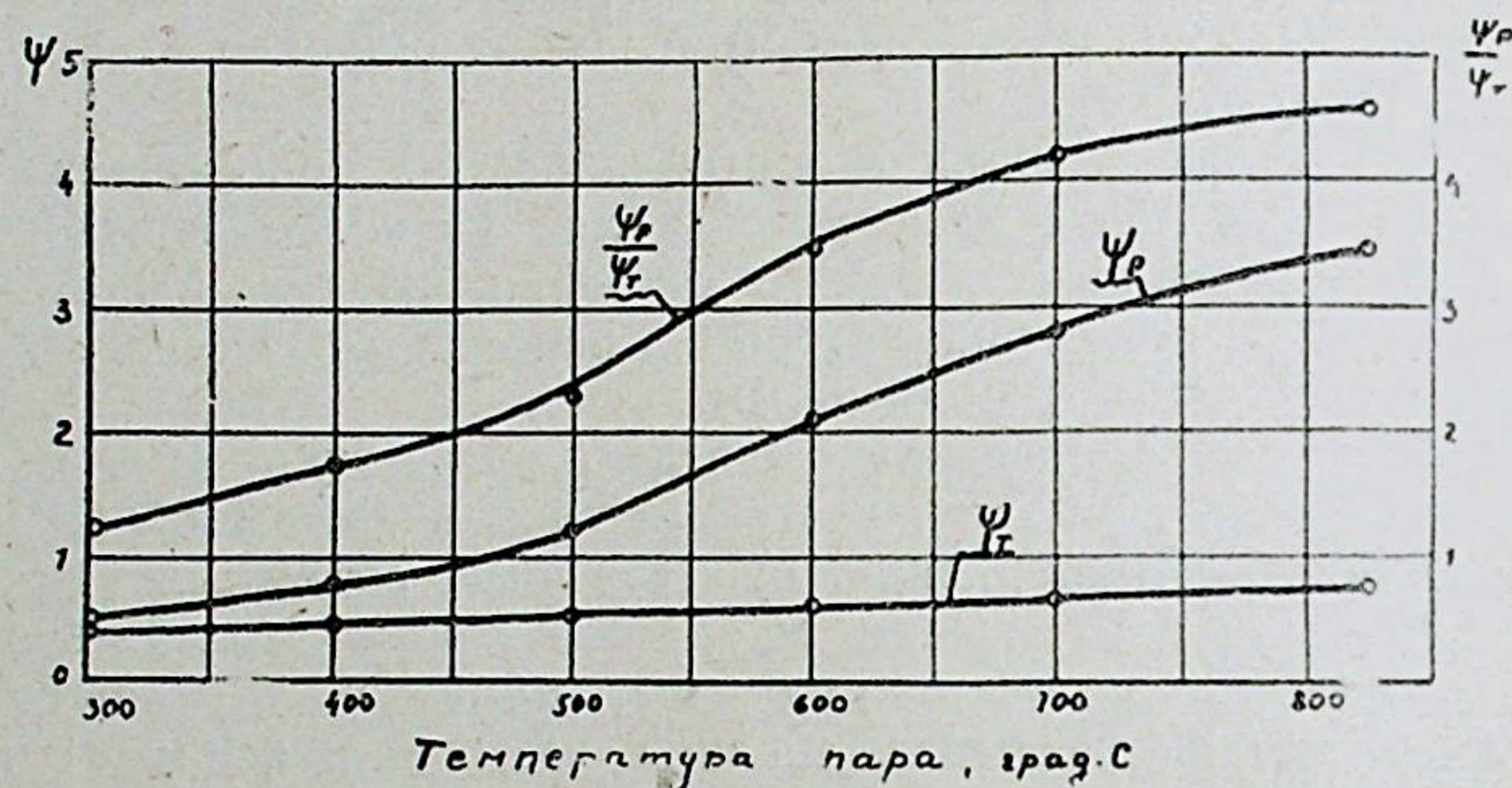


Рис. 1. Влияние термического разложения угольных шаров на коэффициент гидродинамического сопротивления.

На рис. 1 приведены изменения действительного  $\psi_r$  и теоретического  $\psi_t$  коэффициентов сопротивления угольных шаров, а также отношение этих величин в зависимости от температуры перегретого пара. Как видно из рис. 1. при низких температурах, когда степень разложения угля мала, шарики двигаются почти как инертные, но при  $700$ — $800^\circ$  отношение действительного к теоретическому коэффициенту сопротивления достигает  $4$ — $4,5$ , что говорит о весьма сильном торможении движения реагирующих частиц. Крутизна кривых с ростом температуры падает; это связано с тем, что

фотографирование шариков производилось в конце их падения, и, следовательно, чем больше была температура пара, тем большая доля процессов разложения угольного вещества протекала до входа шариков в фотографируемый участок.

Результаты наших опытов убедительно и наглядно показывают, что при проектировании аппаратов, связанных с движением топливных частиц в теплоносителе, нельзя пользоваться обычными методами расчета движения инертных тел. Такой расчет приводит к весьма большим ошибкам в определении времени пребывания частиц в аппарате, относительных скоростей движения и всех остальных параметров, связанных с движением частиц и завершением соответствующих процессов. Однако, вместе с этим необходимо добавить, что как опыты, проведенные различными исследователями с горящими угольными частицами, так и наши — с частицами, термически разлагающимися, не дают ключа, раскрывающего все закономерности движения топливных частиц в газовом теплоносителе и не позволяют ~~к широкому~~ широко применять полученные результаты. Это объясняется тем, что в таких экспериментах изменение гидродинамики реагирующих частиц происходит при наличии целого комплекса явлений, что не дает возможности исследователю произвести анализ влияния каждого из факторов. Кроме того, уголь является сложным веществом и, как известно, физико-химические свойства и структура его отличается не только у разных месторождений, но и даже у разных пластов. Вот почему данные, полученные в опытах с горящими или термически разлагающимися частицами конкретного угля, нельзя перенести на другие сорта твердого или жидкого топлива, а отсутствие анализа влияния отдельных факторов на изменение гидродинамики частиц не позволяет хотя бы приблизительно делать прогнозы о поведении других реагирующих частиц и даже частиц из других сортов угля. Ниже описываются исследования, которые, хотя и не позволяют пока установить количественные связи в поведении реагирующих частиц, но зато раскрывают физическую картину явлений и дают возможность предугадывать, в каком направлении надо ожидать изменение гидродинамики.

## 2. Влияние экзо- и эндотермических реакций

Опыты для определения влияния экзо- и эндотермических реакций в частицах на их движение проводились в модельной жидкостной установке путем скоростной киносъемки глиняных обожженных сферических частиц, свободно падающих в вертикальной трубе диаметром 45 мм и длиной 1 м, заполненной дистиллированной водой. Движение двенадцати автоматически подаваемых через равные промежутки времени пятимиллиметровых шариков, вес которых отличался не более чем на 0,6%, снималось кинокамерой со скоростью до 4000 кадров в секунду в двух точках: в начале трубы при неустановившемся движении и в конце трубы, где движение было практически стационарным. Шары сами по себе не были реагирующими телами, так как материал, из которого они были сделаны, совершенно инертен к воде, в которой они падали. Они были лишь носителями реагирующего вещества, которым пропитывались перед каждым опытом, причем шарами адсорбировалось реагирующего вещества не менее 35—40% их собственного веса, что являлось достаточным запасом для интенсивной реакции в течение всего времени падения шаров в трубе. Например, для создания модели движения инертного тела они насыщались той же жидкостью, в которой наблюдалось их падение, для модели экзотермического движения — серной кислотой, эндотермического — азотнокислым аммонием.

Для создания изотермического режима, предотвращающего возникновение конвективных течений, а также для достижения заданной температуры воды и одинаковой с ней температуры падающих шариков, установка термостатировалась в водяной бане. Опыты производились при различных температурах воды, что изменяло число Рейнольдса и, следовательно, условия взаимодействия между ней и твердыми частицами — шарами. Обработка снимавшихся кинофильмов позволяла производить измерение пути и времени движения, а следовательно, и вычисления скорости и коэффициентов сопротивления падающих шаров в любой точке их траектории. Определение скорости и коэффициента сопротивления производилось по методу, изложенному в работе Т. Н. Худякова и З. Ф. Чуханова, и измененному нами.

Для проверки работы установки, а также для получения «эталонных» характеристик, с которыми в дальнейшем сравнивалось движение активных, реагирующих с водой частиц, был проделан ряд опытов, в которых наблюдалось падение шаров, насыщенных дистиллированной водой при различных температурах. Результаты этих опытов показывают, что коэффициенты сопротивления падающих инертных шаров хорошо укладываются на кривой, эквидистантной теоретической зависимости. Это доказывает правомерность примененного метода. Разность между теоретическим и действительным значениями составляет 18,5%, что является результатом стесненности условий падения и определенной шероховатости шаров.

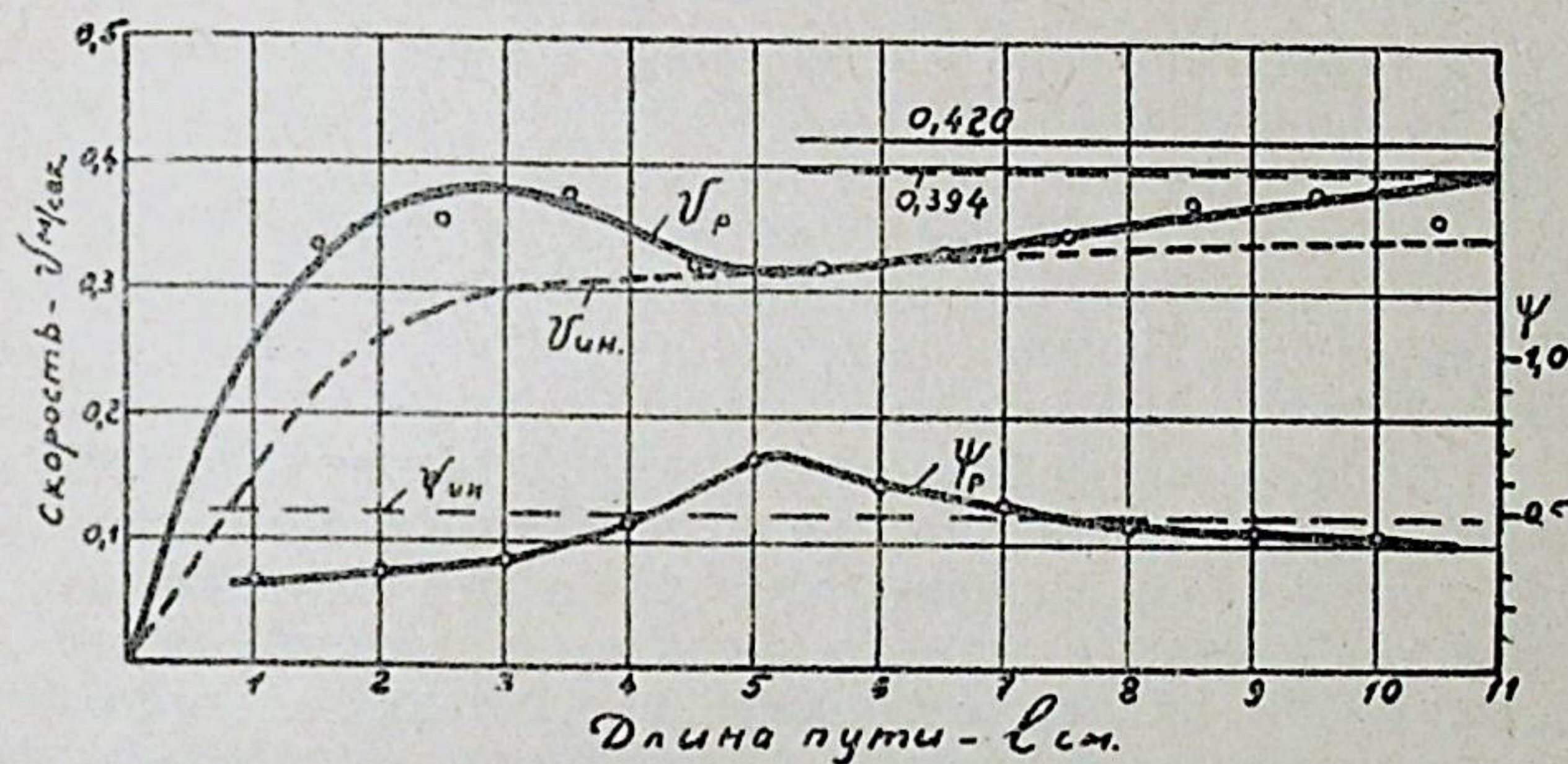


Рис. 2. Движение тепловыделяющих шаров.

Первая серия испытаний с реагирующими частицами была проведена с шарами, пропитанными концентрированной серной кислотой, которая «растворяется» в воде с выделением тепла. На рис. 2 приведены типичные кривые изменения скоростей падения инертных  $V_{ин}$  и реагирующих  $V_p$  шаров по высоте трубы  $L$ , причем инертные шары пропитывались водой и испытывались в аналогичных условиях. Прямыми линиями на рис. 2 обозначены: сплошной (0,420 м/сек) — фактическая скорость установившегося движения реагирующего шара; пунктирной (0,394 м/сек) — расчетная скорость устано-

вившегося движения инертного шара, имеющего тот же удельный вес, что и реагирующий.

Рассмотрим процесс движения частицы, насыщенной концентрированной серной кислотой, в трубе, заполненной водой при  $60^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2). В первый момент реагирующая частица падает быстрее более легкой инертной, но в то время, как инертная частица на пятом—седьмом сантиметре движения в воде приобретает скорость, близкую к установившейся, частица, насыщенная серной кислотой, вообще не успевает достигнуть такой скорости и примерно на третьем сантиметре скорость ее движения начинает снижаться. В дальнейшем скорость реагирующего шарика снова начинает увеличиваться, постепенно достигая значения, на 20—30% превышающего скорость падения инертного шарика, заполненного водой.

В период падения частиц, насыщенных серной кислотой, процесс развивается следующим образом. В первый момент частица падает в воде значительно быстрее, чем инертная. При этом протекает ряд процессов, таких как реагирование с образованием гидратов, диффузия гидратов в окружающую среду и теплообмен шарика с той средой, в которой он падает.

В начальный момент движения, когда интенсивность растворения серной кислоты наиболее велика, скорость выделения тепла максимальна и вязкость пограничного слоя у падающего шарика значительно снижается; поэтому шары падают с большей скоростью, а коэффициент гидродинамического сопротивления их заметно уменьшается. В дальнейшем, однако, движение шариков замедляется в связи с ростом коэффициента сопротивления за счет повышения вязкости пограничного слоя, которая растет с насыщением этого слоя серной кислотой. Нагревание жидкости у поверхности при этом снижается. Последнее явление происходит потому, что при сильной растечке тепла внутрь шарика и в жидкость, суммарная скорость реагирования снижается из-за торможения диффузией. По мере дальнейшего реагирования насыщение пограничного слоя серной кислотой заметно ослабевает, а нагрев шарика и пограничного слоя жидкости приводит к снижению вязкости этой жидкости и соответствующему уменьшению коэффициента сопротивления движения шарика.

Общее выделение тепла за счет растворения серной кислоты в воде составляет в нашем случае 7,2 кал. Если это тепло пошло только на нагрев шарика, то он нагревался бы от  $60^{\circ}$  почти до  $200^{\circ}\text{C}$ . Однако, одновременно с выделением тепла и нагревом шарика идет процесс теплообмена с окружающей средой. Интенсивность теплоотдачи очень высока, порядка 10 кал. на градус в секунду, что должно приводить к быстрому прогреву жидкости вблизи падающего шарика и снижению ее вязкости. Это и наблюдается в наших опытах.

Процесс диффузии кислоты и воды протекает значительно медленнее, чем реагирование и теплообмен. Величина критерия Прандтля, в частности, составляет 1,8—4, то есть значительно больше, чем для газов. Вся динамика процесса движения шарика определяется в наших условиях весьма сложной системой дифференциальных уравнений, включая уравнения диффузии и теплообмена. Решение этой системы уравнений неосуществимо сейчас, тем более, что кинетика реакций, а следовательно, и тепловыделения не изучены, не говоря уже о том, что диффузионные и тепловые процессы резко различаются вне и внутри частицы и для их описания требуется две системы уравнений.

Для нас, однако, на этом этапе исследований важно в первую очередь качественно охарактеризовать процессы, протекающие в системе, чтобы выяснить характер изменения движения частиц и оценить возможный порядок влияния теплового эффекта реакции на это движение.

Особый интерес, по нашему мнению, вызывают результаты, полученные в конце трубы в условиях гидродинамически установившегося режима, где концентрация кислоты в пограничном слое крайне мала, а тепловыделение, хотя и меньше, чем в первые моменты движения, но все же достаточно интенсивное. Коэффициент сопротивления реагирующих шариков, как показывают опыты, был на 20—25% ниже, чем инертных. Отличие коэффициента сопротивления реагирующих шаров от инертных несколько уменьшается при увеличении числа Рейнольдса. Это объясняется тем, что возрастание числа Рейнольдса в опытах достигалось повышением температуры воды, вязкость которой резко изме-

няется при низких температурах и незначительно — при высоких. Следовательно, один и тот же градиент температур в пограничном слое должен вызывать различные изменения в его вязкости в зависимости от общей температуры среды.

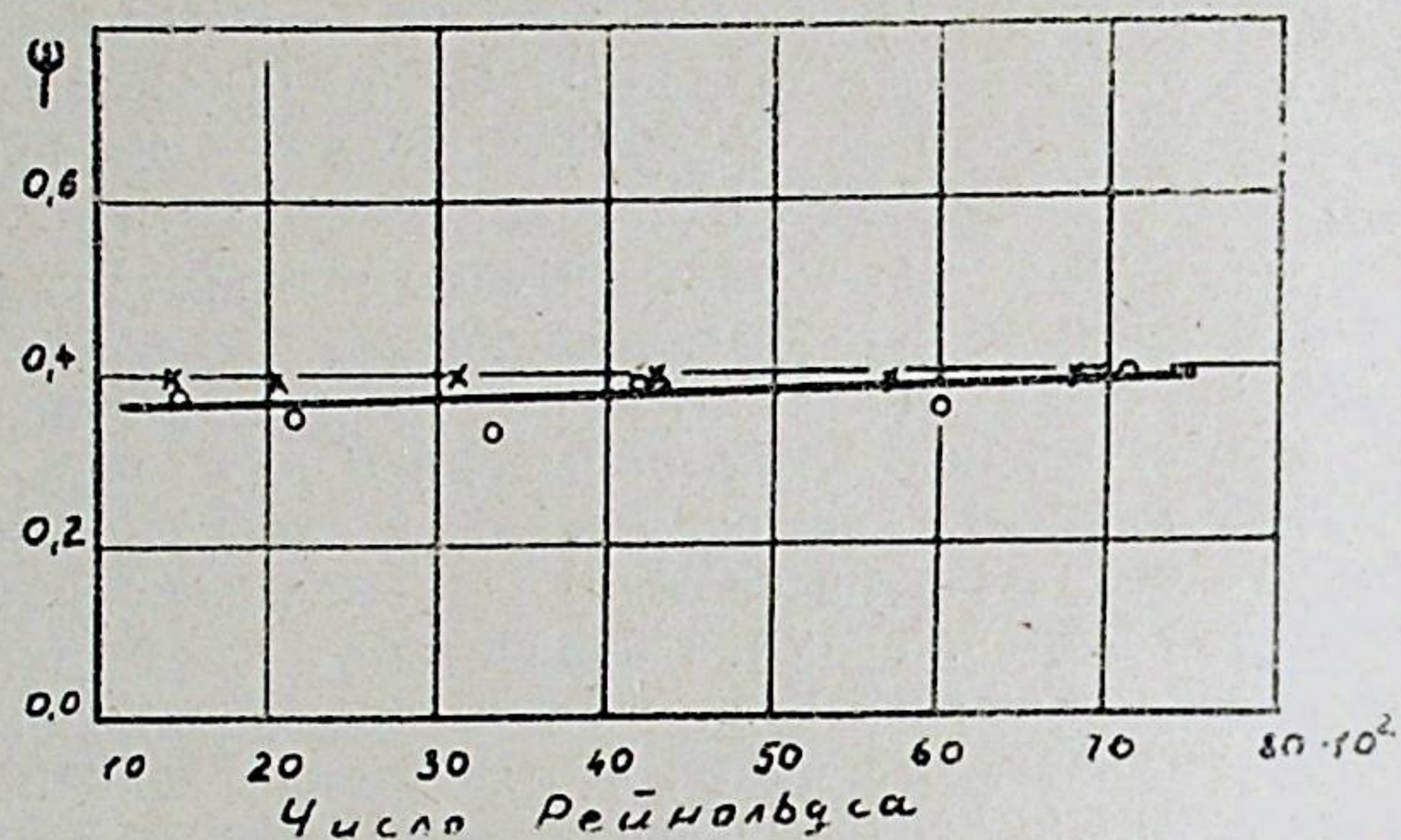


Рис. 3. Коэффициент сопротивления тепловыделяющих шаров в области установившегося движения.  
 о — данные из опытов,  
 х — расчетные значения.

Необходимо отметить, что рассчитанные из опытных данных коэффициенты сопротивления реагирующих шаров показывают сравнительно сильный перегрев пограничного слоя жидкости, температура которой во многих случаях должна доходить до  $100^{\circ}\text{C}$  и даже выше. Если принять, что температура пограничного слоя вблизи шариков во всех опытах была равна  $100^{\circ}\text{C}$ , то можно теоретически определить скорость витания и коэффициент сопротивления реагирующих шаров для этого случая. На рис. 3 приведены результаты таких расчетов, из которых видно, что значения, полученные вычислением, весьма близки к опытным данным. Однако, в расчетах не принималось во внимание влияние стесненности условий падения и шероховатости шаров, которое в нашей установке повышает коэффициент сопротивления на

$18,5\%$ . Следовательно, как видно из рис. 3, изменение вязкости пограничного слоя даже при условии нагрева его до  $100^{\circ}\text{C}$  недостаточно для того, чтобы только этим объяснить полученное уменьшение сопротивления реагирующих шаров в области стационарного движения. Расчеты показывают, что если бы примененные шары двигались в сплошной паровой рубашке, то коэффициент сопротивления их был бы равен  $0,183$ , что значительно меньше действительного значения. По-видимому, только некоторое количество воды пограничного слоя переходит в пар, который немедленно конденсируется, отдавая свое тепло окружающей воде.

После проведения экспериментов, моделирующих движение реагирующих частиц при наличии экзотермических реакций, весьма важным была организация опытов с частицами, поглощающими тепло во время полета. Постановка опытов, моделирующих эндотермическое движение частиц, обуславливалась необходимостью проверки предыдущих данных, которые подтверждались бы получением обратных результатов. В данном случае в лабораторной установке фотографировалось падение в воде тех же шаров, которые использовались в предыдущих опытах, но на этот раз они были пропитаны не серной кислотой, а азотнокислым аммонием, растворяющимся в воде с отрицательным тепловым эффектом. Шары насыщались реагирующим веществом двумя способами: 1) пропитывались концентрированным раствором при  $20^{\circ}\text{C}$ ; 2) погружались в расплавленное вещество при  $170^{\circ}$ , то есть заполнялись твердым азотнокислым аммонием. Количество реагирующего вещества в двух этих партиях шаров стало неодинаковым также, как и интенсивность теплопоглощения их в воде.

Анализ движения шаров, заполненных раствором азотнокислого аммония, показал, что коэффициент гидродинамического сопротивления их не отличался от инертных ни в начале падения, ни в конце. Это объясняется слишком малым количеством тепла, поглощаемым в данном случае, недостаточным для того, чтобы изменение гидродинамики стало заметным. Опыты с шарами, наполненными твердым азотнокислым аммонием, дали ожидаемый результат: охлаждение пограничного слоя жидкости привело к сильному повышению

его эффективной вязкости и уменьшению скорости падения по сравнению с инертными.

В области неустановившегося движения шары, наполненные твердым азотнокислым аммонием падали во всех случаях медленнее более легких—инертных. Наибольшее торможение наблюдалось на четвертом—пятом сантиметре падения. Затем торможение уменьшалось и внизу установки, где скорость становилась постоянной, коэффициент сопротивления реагирующих шаров был на 20—30% больше, чем у инертных. При увеличении числа Рейнольдса эта разница становилась меньше, что является результатом нелинейной связи между температурой воды и ее вязкостью. Однако, в данных опытах это явление проявлялось слабее, чем в опытах, моделирующих экзотермическое движение, что можно объяснить значительным увеличением растворимости азотнокислого аммония и, следовательно, большим поглощением тепла реагирующими частицами при повышении температуры окружающей среды. Действительно, растворимость азотнокислого аммония в воде при температуре 20°C составляет 178 г на литр, а при 100°C она вырастает до значения 1010 г на литр.

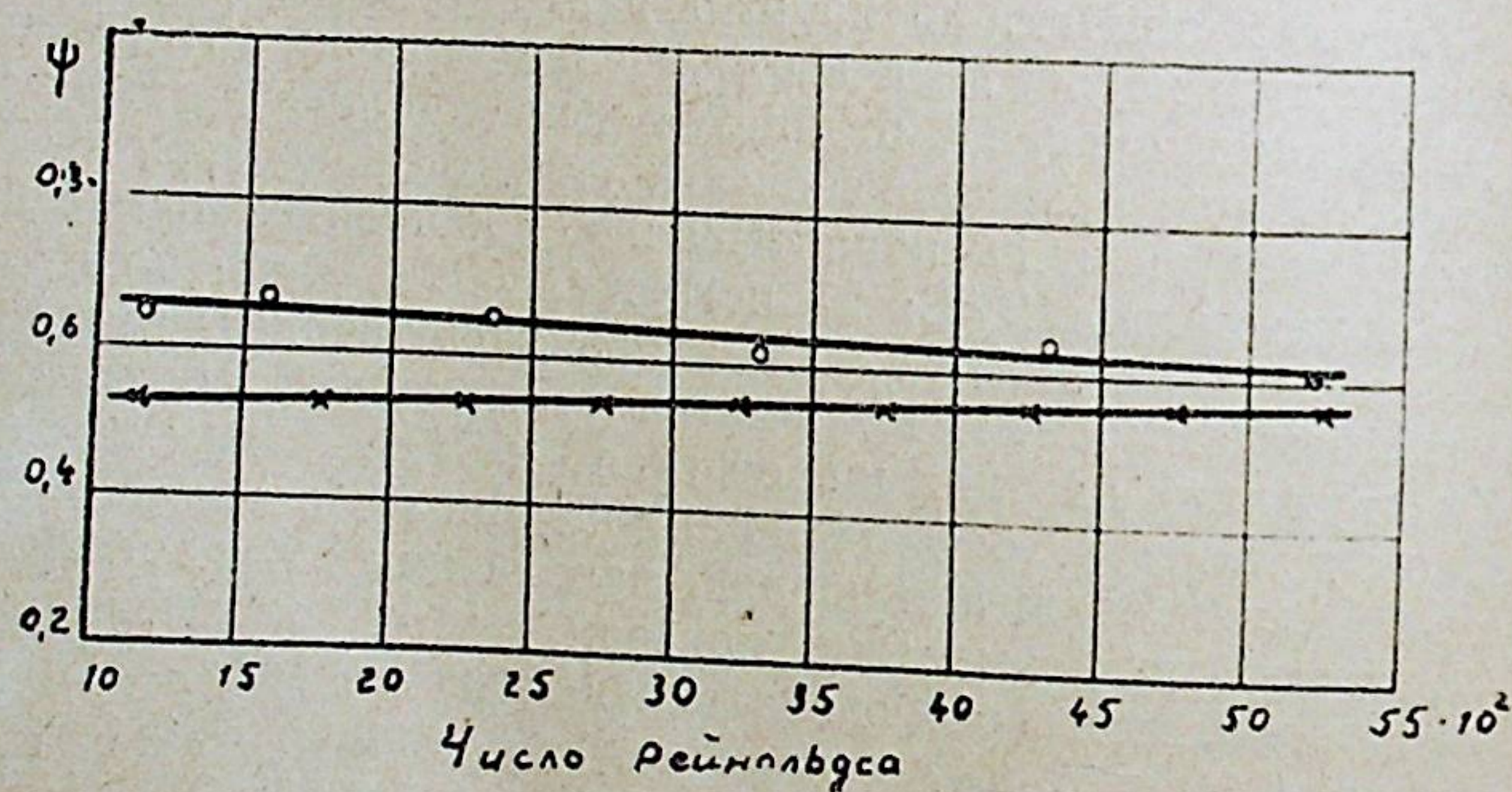


Рис. 4. Коэффициент сопротивления теплопоглощающих шаров в области установившегося движения.  
 ○ — данные из опытов,  
 × — расчетные значения.

Необходимо добавить, что влияние процесса эндотермического растворения азотнокислого аммония в воде на движение шариков было настолько велико, что по данным расчета, наблюдавшееся торможение частиц могло иметь место только при сильном охлаждении пограничного слоя и шарика, доходящем до нуля град. С и даже ниже. На рис. 4 приведены значения расчетного коэффициента гидродинамического сопротивления реагирующих шаров и полученного из опытов при установившемся движении. Расчет производился для гладких шаров без учета стесненности условий падения для того случая, когда температура пограничного слоя равна нулю град. С. Если эти результаты увеличить на 18,5%, чем оценивается, как было показано выше, влияние шероховатости и стесненности в нашей установке, то легко заметить, что кривые в правой части рис. 4 будут совпадать, а в левой—отличаться лишь на 5%. Эту разницу можно объяснить погрешностью экспериментов, либо естественно предположить, что в области низких температур опыта ( $Re=1000$ ) на поверхности реагирующих частиц могли появиться отдельные кристаллики льда, дополнительно увеличивающие сопротивление падающих шаров. Совершенно очевидно, что эти образования льда немедленно плавилась, забирая тепло у окружающей их воды.

Полученные результаты исследований экзо- и эндотермического движения твердых реагирующих частиц убедительно доказывают, что выделение или поглощение ими тепла существенно изменяет скорость и время движения. При расчете этих величин нельзя пользоваться обычными методами, так как стандартная зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса в данном случае неприменима. Величина коэффициента сопротивления реагирующих частиц в большой мере зависит от интенсивности выделения или поглощения ими тепла и от того, как меняется вязкость граничного слоя жидкости или газа вблизи движущейся частицы. Коэффициент сопротивления реагирующих частиц увеличивается в том случае, если тепловой эффект реакций, протекающих в них, увеличивает вязкость окружающей среды и наоборот.



### 3. Влияние газовыделения

Выделение летучих веществ из реагирующих частиц обычно принимается за один из видов массообмена, и расчет реакционных аппаратов производится, как правило, по скоростям и траекториям частиц, найденным по законам движения изменяющихся масс. При этом, однако, допускаются весьма большие ошибки, а иногда гидродинамика реагирующих частиц меняется в направлении прямо противоположном тому, которое вытекает из расчетов. Так, например, из теоретической механики известно, что тело, уменьшающее свою массу, должно двигаться ускоренно. Большинство же исследователей убедились, что движение газовыделяющих частиц, как правило, бывает замедленным. Существующее на этот счет мнение заключается в том, что на реагирующую частицу помимо сил, вызванных изменением массы, действуют реактивные силы струй вытекающего газа. Не отрицая наличия локальных реактивных сил в реальных частицах, имеющих произвольную форму и неправильное внутреннее строение, необходимо признать, что эти силы вряд ли могут длительное время создавать ускорение или замедление в одном направлении, поскольку поступательное движение таких частиц, как это было доказано в работе Г. Н. Худякова, всегда сопровождается их вращением. По-видимому, причины изменения гидродинамики лежат в искажении обычной картины обтекания тела при выделении из него летучих веществ. Исходя из вышесказанного, мы решили провести такие исследования, которые исключали бы влияние формы и локальных сил. Для этого опыты по изучению гидродинамики газовыделяющих частиц проводились с телами правильной формы, то есть с шарами. Эти шары имели равномерную пористую структуру материала, что позволяло газам свободно выделяться со всей поверхности: тем самым исключалось появление каких-либо локальных сил. Характеристика и метод изготовления шаров описывались выше.

Первая серия этих опытов проводилась с шарами, пропитанными насыщенным раствором углекислого натрия при 100°C. Поскольку труба, в которой свободно падали реагирующие шары, наполнялась 10% раствором соляной кислоты, то движение их сопровождалось взаи-

модействием соды с кислотой и бурным выделением пузырьков углекислого газа. Анализ кривых изменения скорости шаров показал, что выделение пузырьков углекислого газа производит тормозящее действие на реагирующие частицы.

Шарики падали в раствор кислоты с некоторой начальной скоростью, определяемой высотой свободного полета—1 см, которая у инертных шариков, насыщенных не содой, а 10% раствором соляной кислоты, после удара о поверхность жидкости продолжала увеличиваться, асимптотически приближаясь к скорости витания. Реагирующие же шары вели себя иначе. После удара о поверхность, как только из них начинали выделяться пузырьки углекислого газа, их скорость уменьшалась до некоторой величины тем меньшей, чем была больше температура опыта. Затем по мере ослабления интенсивности выделения газа их скорость становилась больше, асимптотически приближаясь к постоянной величине, меньшей, чем скорость витания инертных частиц.

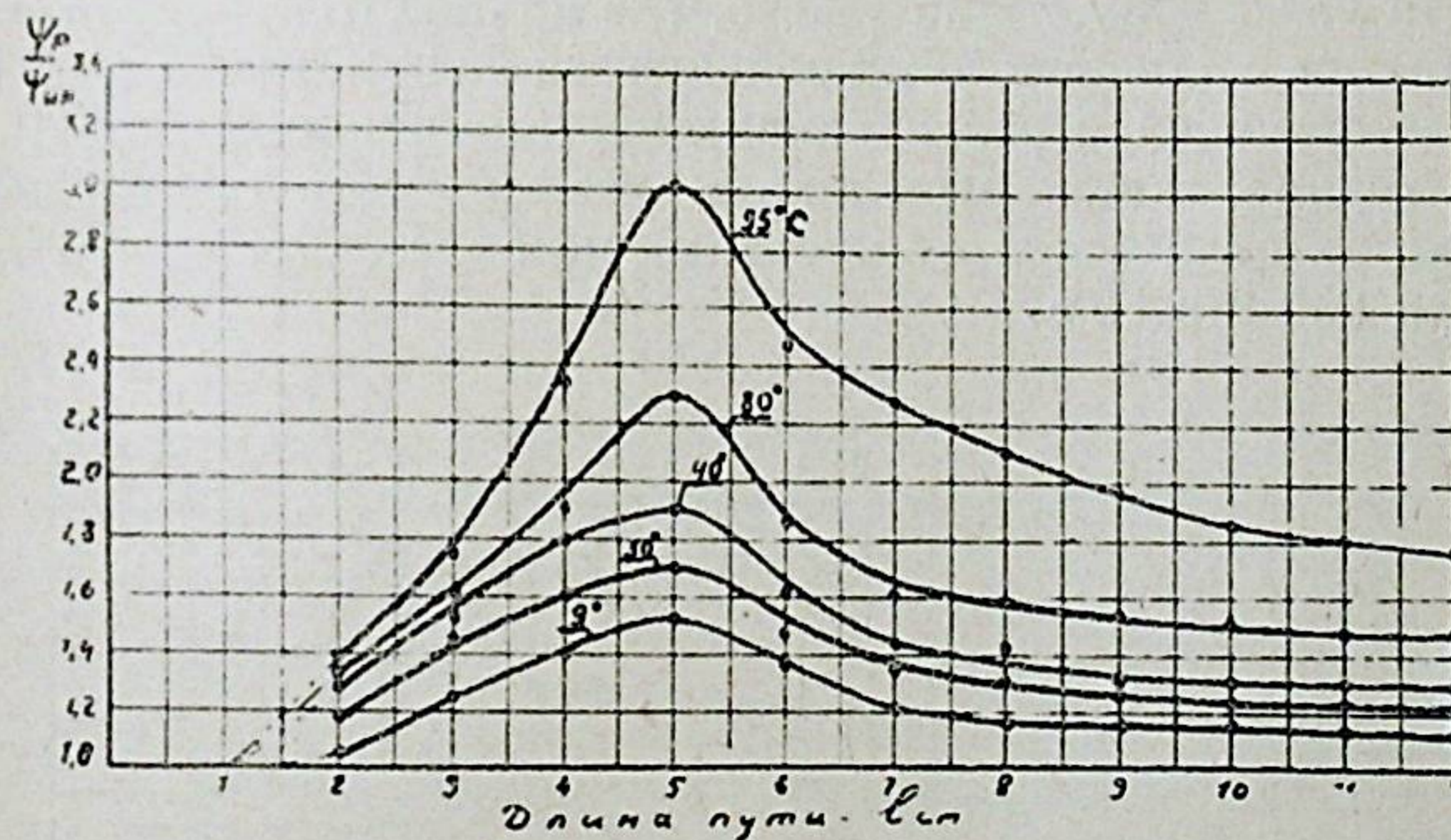


Рис. 5. Изменение коэффициента сопротивления газовыделяющих шаров, заполненных раствором соды, в области неустановившегося движения.

На рис. 5 приводится отношение коэффициентов сопротивления реагирующих шаров к инертным в зависимости от температуры опытов. По оси абсцисс отложена высота от начала падения частиц. Из приведенных кривых видно, что сопротивление шаров быстро возрастает, достигая максимума на четвертом сантиметре

338081

18/10/11

Центральная научная библиотека

менте их движения в жидкости, причем на кадрах кино- пленки в этот момент фиксируется наиболее бурное вы- деление углекислого газа и образование хвоста из его пузырьков. С увеличением температуры опытов реак- ция между кислотой и содой ускоряется, интенсивность выделения газа растет и, в результате, увеличивается торможение реагирующих частиц. Так, например, при температуре опыта  $9^{\circ}\text{C}$  коэффициент сопротивления ре- агирующей частицы в момент наибольшего выделения газа в 1,5 раза больше инертного, а при  $95^{\circ}$ —в 3 раза. По мере дальнейшего падения, когда реакция с поверх- ности переходит в глубину шариков и скорость ее уменьшается из-за торможения диффузией реагирующих веществ и выделяющихся продуктов, сопротивление ча- стиц падает, но все же не становится равным сопротив- лению инертных. При большом расстоянии от начала падения скорость реакции становится постоянной, а движение шариков—равномерным. Однако и в этом случае их скорость меньше, чем у инертных частиц, и эта разница тем больше, чем выше температура опыта. Это легко увидеть на рис. 6, где приводятся результаты опытов в области установившегося движения. Как вид- но торможение реагирующих частиц при низких темпе- ратурах реакции невелико и коэффициент сопротивле- ния их отличается от инертных не более, чем на 10%, а при  $95^{\circ}$ —на 65%.

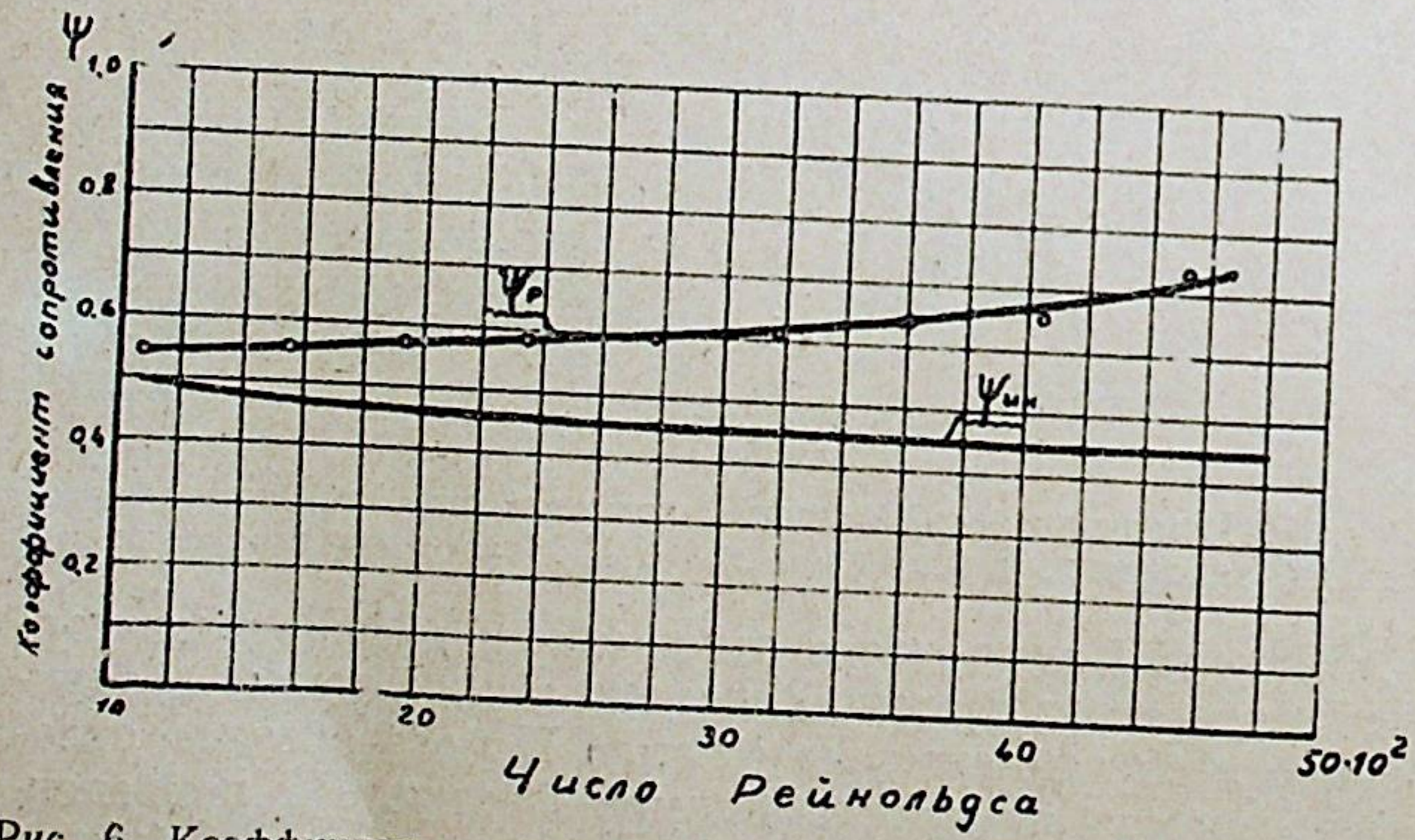


Рис. 6. Коэффициент сопротивления газовыделяющих шаров, на- полненных раствором соды, в области установившегося движения.

Сопоставление результатов, полученных при движе- нии реагирующих газовыделяющих частиц в различных условиях, позволяет сделать некоторые важные выводы, касающиеся причин и механизма торможения движения этих частиц. Как предполагали некоторые исследовате- ли процесса горения углеродных частиц, торможение газовыделяющих частиц связано с подъемными силами, которые вызываются реакцией струй и различием плот- ностей выделяющихся из частиц продуктов и окружаю- щей их среды. По данным наших опытов эти причины, имеющие некоторое значение в реальных частицах про- извольной формы и неправильного внутреннего строения, не имеют решающего значения в наших условиях. При падении реагирующих газовыделяющих частиц в жид- кости процесс получается весьма сложным и, наряду с образованием «сжатого газового пузыря» вокруг ша- риков, который увеличивает сечение миделя, с искусст- венной турбулизацией пограничного слоя, выделяющи- мися из шариков пузырьков газа, а также с неизотер- мичностью процесса, может при небольшой высоте слоя жидкости в заметной мере проявляться эффект «аэрлиф- та», то есть снижения статического давления слоя во- ды над падающим шариком. Все эти причины, вместе взятые, могут в заметной степени затормозить падение шариков, хотя отдельные факторы, и в частности экзо- термический эффект реагирования соды с кислотой, как это было показано выше, могут снизить коэффициент сопротивления, а следовательно, ускорить падение. Есте- ственно, что интенсивность реакций является решающим фактором, определяющим конкретные значения коэф- фициента гидродинамического сопротивления реагиру- ющих частиц.

Вторая серия опытов, посвященных изучению движе- ния газовыделяющих частиц, проводилась в тех же ус- ловиях, что и первая, и с теми же шарами, однако на- полнителем реагирующих частиц был не раствор соды, а осажденные ее твердые кристаллики. Для этой цели шары, пропитанные концентрированным раствором со- ды при  $100^{\circ}\text{C}$ , медленно высушивались на воздухе в течение двух суток, а затем в термостате при темпе- ратуре  $105-110^{\circ}$  не менее двух часов. Многочисленные опыты показали, что при такой методике сушки шаров сода не выступала и не концентрировалась на их по-

верхности, что было бы крайне нежелательно. Необходимо подчеркнуть, что количество соды, по сравнению с содержанием ее в шарах, насыщенных раствором, не изменилось. Однако, если в предыдущих опытах интенсивность реакции между раствором соды и соляной кислотой определялась скоростью диффузии этих жидкостей, то теперь—скоростью проникновения кислоты в макропоры шаров. Это значительно увеличило интенсивность выделения углекислого газа и еще более обострило влияние этой реакции на гидродинамику частиц.

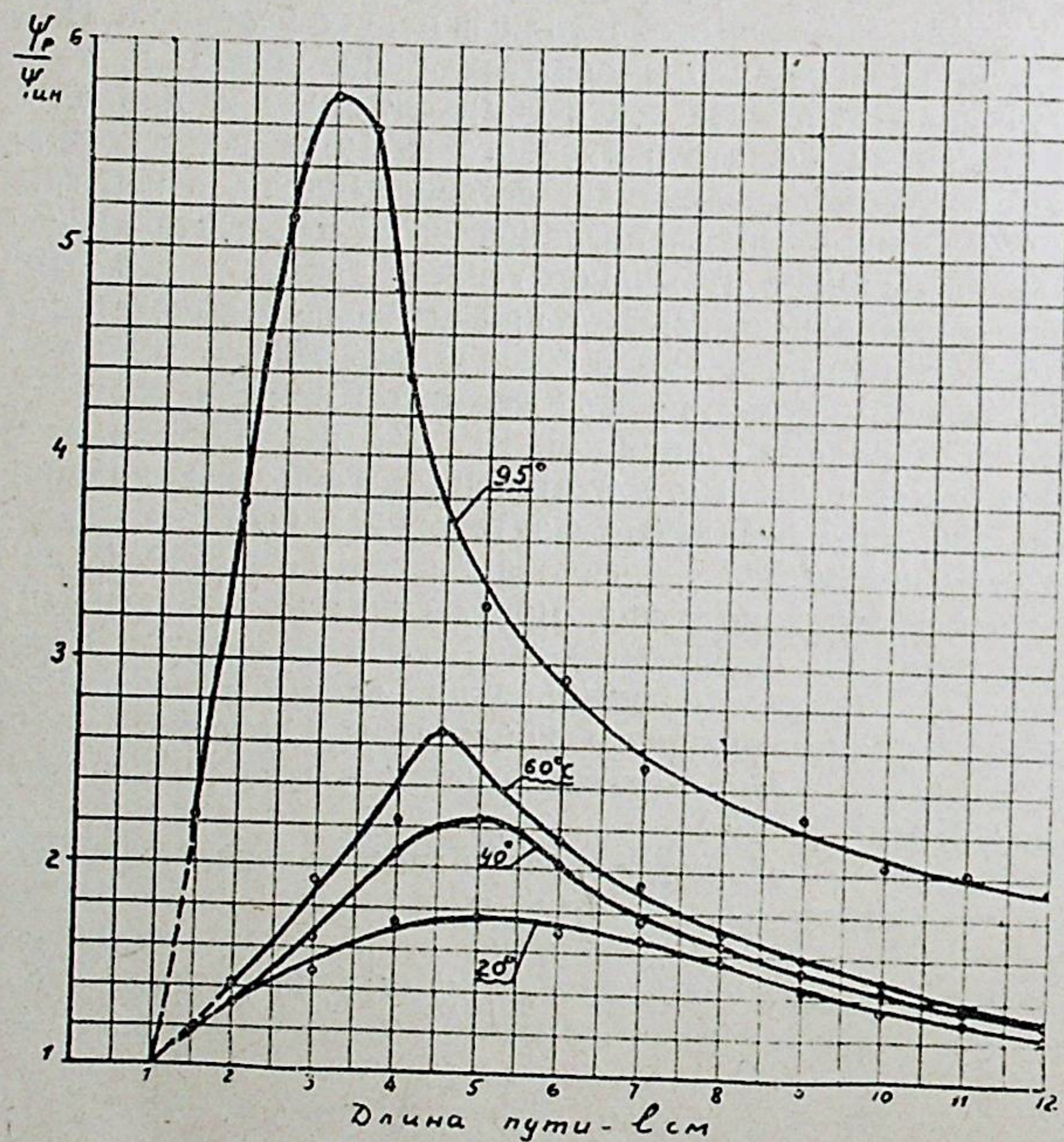


Рис. 7. Изменение коэффициента сопротивления газовыделяющих шаров, заполненных осажденными кристалликами соды, в области неустановившегося движения.

Сопротивление движения в этих условиях еще более возросло, что видно из рис. 7, где приводится отношение коэффициентов сопротивления реагирующих шаров к инертным при различной температуре опытов. Данные кривые отличаются от аналогичных кривых первой серии наших испытаний (см. рис. 5) не только ростом абсолютного значения всех максимумов, но и тем, что максимумы сдвигаются влево с увеличением температуры опыта. Это явление объясняется тем, что с повышением температуры уменьшается вязкость раствора соляной кислоты, а это способствует более быстрому проникновению ее в поры шариков и, следовательно, более интенсивному реагированию. Следует отметить, что полученный эффект торможения весьма значителен, совершенно однозначен и ярко выражен.

Процессы реагирования в данных условиях сопровождались интенсивным массообменом шариков за счет присоединения массы проникающего в них раствора соляной кислоты. Поскольку увеличение массы также приводит к уменьшению скорости частиц (что может быть принято за увеличение их сопротивления), то необходимо оценить это влияние. Наши опыты, проведенные с сухими шарами, свободно падающими в трубе, наполненной дистиллированной водой, в этой же установке показывают, что условное увеличение коэффициента сопротивления в данном случае составляет самое большое 35—70%. Суммарное же сопротивление реагирующих шаров, заполненных кристалликами соды, как это видно из рис. 7, возрастает от двух до шести раз. Следовательно, не остается сомнений в том, что наибольшее значение имеет процесс выделения газообразных продуктов, и наблюдаемый эффект торможения в основном возникает за счет изменения характера обтекания реагирующей частицы выделяющимися из нее летучими продуктами.

Большинство современных реакционных аппаратов работает, как правило, с газовым, а не жидким теплоносителем. Поэтому после изучения гидродинамики газовыделяющих частиц в жидкости не может не представлять интереса поведение их в газовой среде. Для этой цели нами была проведена третья серия опытов, в которой фотографировалось падение шариков, насыщенных дистиллированной водой, в среде перегрето-

го пара. Для исследования использовалась установка, в которой испытывались угольные шары. Материал и метод изготовления шаров оставались точно такими же, как в опытах, где частицы падали в жидкой среде. Колба-приемник в данном случае не заполнялась водой, а после каждого опыта взвешивалась вместе с упавшими в нее шарами: этим контролировалась эффективность сушки. Для определения скорости и коэффициента сопротивления инертных частиц часть опытов была отведена фотографированию падения сухих шаров.

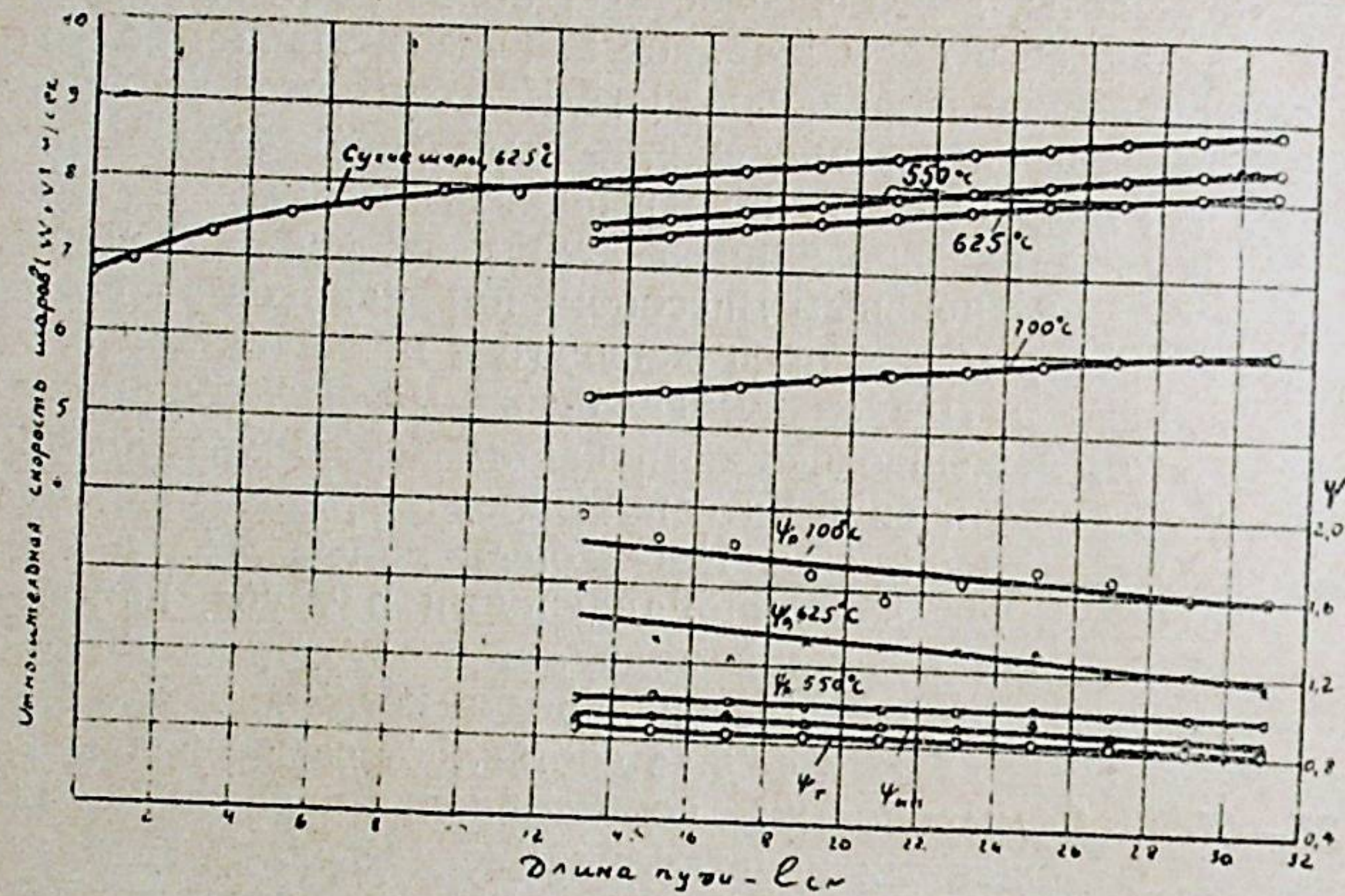


Рис. 8. Относительная скорость и коэффициент сопротивления шаров, подвергавшихся сушке.

Эти опыты для шаров диаметром 5 мм, падающих в противотоке пара с температурой 650°, показали, что выделение из них пара сопровождается эффектом торможения, который характеризуется увеличением коэффициента сопротивления реагирующего шара по сравнению с инертным в 1,36 раза. Опыты по сушке шаров меньшего диаметра дали более значительный результат. Сопоставление коэффициентов сопротивления инертных, то есть сухих шариков диаметром 3 мм —  $\psi_{ин}$  с коэффициентом сопротивления шаров, насыщенных дистиллированной водой  $\psi_p$  приведено на рис. 8. На этом ри-

сунке даны изменения относительных скоростей падения ( $w + v$ ) сухих инертных шариков при 625° и реагирующих, насыщенных водой, при 550, 625 и 700°C. Кривая  $\psi_t$  на рис. 8 отвечает расчетному значению коэффициента сопротивления для движения инертных гладких сферических частиц. Из рис. 8 видно, что скорость падения мокрых более тяжелых частиц меньше, чем более легких сухих, хотя на первый взгляд кажется, что должно быть наоборот. Из этих же кривых следует, что при высоких температурах пара в области более интенсивной сушки, торможение падения частиц сильнее.

Как видно, в условиях сушки частиц в перегретом паре снижение температуры пограничного слоя в начальном участке трубки уменьшает значение  $\psi_p$  ниже  $\psi_{ин}$  за счет понижения вязкости пограничного слоя пара; но как только начинается интенсивное выделение пара из пор нагревающегося шарика, коэффициент сопротивления резко повышается. Это, очевидно, возможно только в том случае, если вокруг шарика образуется упругий «газовый пузырь», движущийся вместе с шариком в окружающей среде и увеличивающий его активное сечение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано движение угольных частиц в газовом теплоносителе и найдено, что процессы, сопровождающие термическое разложение угольного вещества, сильно влияют на свободное падение этих частиц, коэффициент гидродинамического сопротивления которых возрастает в сравнении с инертными до 4-х раз в зависимости от температуры теплоносителя. Моделирование отдельных процессов, сопровождающих термическое разложение, позволило установить, что выделение или поглощение тепла реагирующими частицами, изменяя вязкость граничного с ними слоя теплоносителя, в заметной степени влияет на величину их сопротивления при движении. Кроме этого установлено, что в случае выделения частицами газообразных продуктов скорость движения твердых реагирующих частиц нельзя рассчитывать, исходя из одной лишь теории точки переменной массы И. В. Мещерского, так как она не принимает во

внимание изменению характера обтекания частиц выделяющимися из них газами.

В данной работе было снято 106 кинофильмов, в которых просмотрено 150 тысяч кадров. Моделирование отдельных процессов, сопровождающих термическое разложение угольных частиц, находящихся во взвешенном состоянии в среде газового теплоносителя, позволяет сделать некоторые общие выводы относительно причин наблюдавшегося торможения свободного падения этих частиц. Движение этих частиц сопровождается на первой стадии некоторой эндотермичностью процесса, что, благодаря уменьшению вязкости газового пограничного слоя, может вначале несколько уменьшить коэффициент их гидродинамического сопротивления. Однако, как только температура внешних слоев частиц достигнет  $100^{\circ}\text{C}$ , из них начинает выделяться пар, что влечет за собой торможение этих частиц. Дальнейший нагрев, связанный с выделением из частиц газообразных продуктов разложения угольного вещества, еще более затормаживает их падение. Поскольку основное количество тепла, как правило, идет в угольных частицах на удаление влаги и их термическое разложение, то процесс нагревания до  $100^{\circ}\text{C}$ , то есть стадия «чисто» эндотермического процесса, занимает мало времени по сравнению с явлениями выделения из угольных частиц парогазовых продуктов, и потому этот процесс не может существенно влиять на гидродинамику угольной реагирующей частицы.

Гидродинамика угольных частиц, применявшихся в наших опытах, в основном определялась выделением парогазовых продуктов. Пар или парогазовая смесь при нагревании угольных частиц с достаточно большой скоростью выбрасывалась из открытых пор, выходящих на поверхность шариков. Эти струи «газа» образовали вокруг твердых частиц весьма своеобразный газовый пузырь, движущийся вместе с шариками. Гидродинамический характер взаимодействия этого «газового» пузыря с окружающей средой, а следовательно, и величина коэффициента гидродинамического сопротивления будут зависеть от ряда факторов, и в первую очередь, конечно, от скорости газовых струй, то есть от интенсивности процессов разложения угля.

Анализ результатов, представленных на рис. 1, на-

глядно показывает количественное влияние температуры перегретого пара на  $\psi_p$  и  $\frac{\psi_p}{\psi_t}$ , причем в силу эндо-

термичности процесса испарения влаги, а также в связи с резкой зависимостью количества выделяющихся из угля летучих от температуры, изменение температуры и количества летучих и смол в угле по сравнению со всеми другими факторами оказывает наиболее сильное влияние на движение рассматриваемых частиц. В производственных устройствах и аппаратах будут наблюдаться такие же отклонения гидродинамики реальных угольных частиц от инертных, как и в рассматриваемых экспериментах, однако произвольная форма и неправильное внутреннее строение угольных частиц значительно усложняет анализ процессов. Изменение формы частиц, подвергающихся термическому разложению, как правило, идет по пути роста их объема, что еще больше увеличит коэффициент гидродинамического сопротивления реальных угольных частиц.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Д. М. Ангер, З. Ф. Чуханов. Движение твердых реагирующих частиц, ИФЖ, № 3, 1961.

2. Д. М. Ангер, З. Ф. Чуханов. Движение газовыделяющих частиц, ИФЖ, № 5, 1961.