

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КУМУЛЯЦИИ В ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИМПЛОЗИИ

INSTABILITY OF CUMULATION IN THE HYDRAULIC MODEL OF CYLINDRICAL IMPLOSION

Е. М. Грязева, А. Г. Иоилев, М. Д. Камчибеков, Е. Е. Мешков, А. В. Немцева, А. С. Репин

E. M. Gryazeva, A. G. Ioilev, M. D. Kamchibekov, E. E. Meshkov, A. V. Nemtseva, A. S. Repin

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Саровский физико-технический институт

«National Research Nuclear University «MEPHI»
Sarov Physical-Technical Institute

Разработана простая методика создания малого начального возмущения течения в гидравлической модели цилиндрической имплозии путем наклона установки на малый угол (и создаваемой при этом разнотолщинности жидкого кольца).

Экспериментально показано, что с начала и до поздней стадии течения возмущение практически не влияет на симметрию течения и кумуляцию. Время начала нарушения симметрии от угла практически не зависит. Прекращение кумуляции (образование кумулятивной струи) происходит тем позже, чем меньше угол наклона.

The simple method of creating a small initial distortion of the flow in hydraulic model of a cylindrical implosion was developed: the installation is inclined at a small angle therefore different thickness of the liquid ring is created. It was shown experimentally that the distortion practically doesn't affect the flow symmetry and cumulation from the beginning to the late stage of the flow. The start time of symmetry breaking was practically independent of the angle. Termination of cumulation (formation of the cumulative jet) occurs later at the lower angle of inclination.

В настоящее время спектр экспериментальных устройств для генерации высоких плотностей энергии весьма многообразен. В работе большинства из них наблюдаются имплозия и кумуляция, которые неизбежно сопровождаются различного рода неустойчивостями, препятствующими концентрации энергии в локальной области. Таким образом, возникает необходимость исследования неустойчивости кумуляции на примере работы простейших наглядных моделей, демонстрирующих данное явление. В настоящей работе пойдет речь об одной из таких моделей.

Известным примером кумуляции энергии в течении имплозивного типа является задача Рэлея о схлопывании полого пузырька в жидкости [1]. В представлении [2] при $r \rightarrow 0$ движение границы пузырька описывается зависимостью:

$$r = \text{const} \cdot (t_f - t)^\alpha, \quad (1)$$

где t – время, t_f – момент времени схлопывания пузырька (фокусировки). Постоянный показатель

кумуляции α варьируется в пределах $0 < \alpha < 1$; в приближении несжимаемой жидкости $\alpha = 0,4$.

В [3–5] описана гидравлическая модель цилиндрической имплозии в виде динамически создаваемого на плоской горизонтальной поверхности жидкого кольца (ограниченного по наружному радиусу цилиндрической стенкой). При осесимметричном растекании (сплющивании) кольца под действием силы тяжести внутренняя граница возникающего течения симметрично сходится, при этом скорость границы кольца нарастает с уменьшением ее радиуса, демонстрируя явление имплозии и кумуляции.

Схема инициирования процесса имплозии в гидравлической модели [5] представлена на рис. 1.

Первоначально жидкое кольцо высотой h ограничено подвижной цилиндрической перегородкой 1, которая стоит на горизонтальном плоском прозрачном (из оргстекла) дне цилиндрического сосуда 2; по боковой поверхности кольцо ограничено цилиндрической стенкой 3. Горизонтальная пластина 4 ограничивает боковое смещение

ние перегородки 1 при ее поднятии. При быстром поднятии перегородки 1 вертикально вверх под действием силы тяжести (g) образуется концентрично сходящееся к оси симметрии течение воды в виде гидравлического скачка, иллюстрирующее процесс цилиндрической имплозии. Для улучшения визуализации скачка вода в отсеке подкрашивается тушью или чернилами. Течение подсвечивается источником света снизу через прозрачное дно сосуда. Регистрация возникающего течения производится через зеркало цифровым фотоаппаратом в режиме видеосъемки

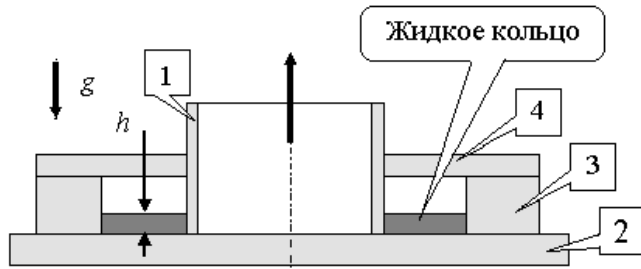


Рис. 1. Схема инициирования цилиндрической имплозии в гидравлической модели

Эксперименты [6] на модели в виде водяного кольца с начальными внутренним и наружным радиусами 60 и 96 мм и высотой кольца $h = 14$ мм показали, что течение в модели [5] имеет характер, аналогичный характеру течения при схлопывании

полого пузырька в жидкости, но с показателем $\alpha = 0,76$. В работах [7, 8] исследовалась зависимость величины α от начальной высоты жидкого кольца h (в интервале $h = 11...17$ мм) с целью выбора величины h для проведения дальнейших исследований влияния начальной асимметрии на кумуляцию течения в гидравлической модели цилиндрической имплозии [5]. Целью данной работы является разработка способа задания начальной асимметрии на жидком кольце и поиск закономерностей ее влияния на кумуляцию.

На рис. 2 приведены кадры видеогаммы одного из опытов [6], частота видеосъемки 480 кадров в секунду, начальная высота кольца $h = 14$ мм.

В работе [6] показано, что по мере схождения внутренней границы жидкого кольца скорость ее нарастает (по модулю), то есть наблюдается кумулятивный эффект. На рис. 3 приведена зависимость радиуса r внутренней границы жидкого кольца от времени в логарифмических координатах для опыта, кадры которого представлены на рис. 2 (без начального возмущения). В этом случае зависимость $\ln r$ от $\ln(t_f - t)$ хорошо описывается линейной зависимостью $\ln r = 0,78 \cdot \ln(t_f - t) + 5,68$, т. е. в данном случае в формуле (1) показатель $\alpha = 0,78$ [6].

Во время проведения экспериментов была обнаружена возможность создания малого возмущения с помощью наклона установки на небольшой

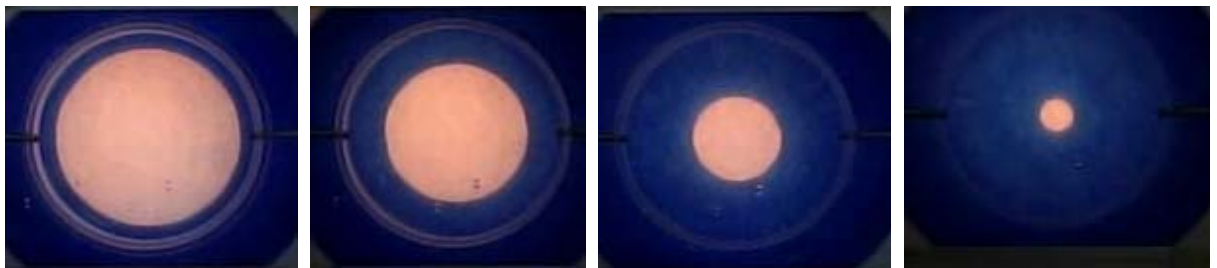


Рис. 2. Кадры видеогаммы течения в одном из опытов для $h = 14$ мм [6]

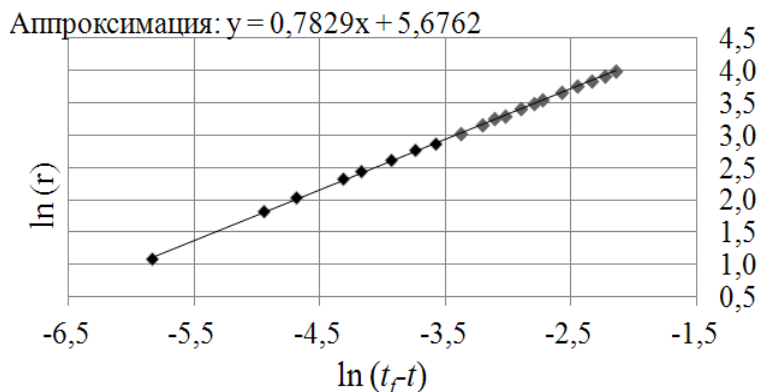


Рис. 3. Зависимость радиуса внутренней границы жидкого кольца от времени в логарифмических координатах в опыте без начального возмущения

угол β относительно горизонта. Для этого была использована сложенная в стопку и подложенная под дно установки бумага. Далее эксперимент проводился по уже отработанной методике. Схема такого способа задания возмущения изображена на рис. 4.

В данной работе представлены результаты опытов, проведенных на установке для трех значений угла наклона: $\beta = 1,03^\circ$; $\beta = 1,36^\circ$; $\beta = 1,63^\circ$. Средняя толщина жидкого кольца $h = 14$ мм (вода была подкрашена чернилами). Скорость видеосъемки 480 кадров в секунду.

На рис. 5 приведены кадры видеогаммы опыта с наибольшим из исследованных начальным возмущением при $\beta = 1,63^\circ$. Видно, что до поздней стадии течения влияние возмущения на симметрию движения внутренней границы жидкого кольца практически не наблюдается. С 51-го кадра

начинает развиваться асимметрия, а с 66-го кадра начинает формироваться горизонтальная кумулятивная струя, симметрия течения нарушается, и кумуляция прекращается.

На рис. 6 изображено развитие течения при различных углах наклона установки. Для каждой строки приведены кадры, соответствующие началу опыта, завершению симметричного течения, началу формирования горизонтальной кумулятивной струи и последней видимой конфигурации полости перед ее схлопыванием.

По данным экспериментов можно сделать несколько выводов:

1. Время начала асимметричного течения (55-й кадр – 0,115 с) не зависит (или зависит слабо) от угла наклона.
2. Время схлопывания полости (~0,154 с) также мало зависит от угла наклона.

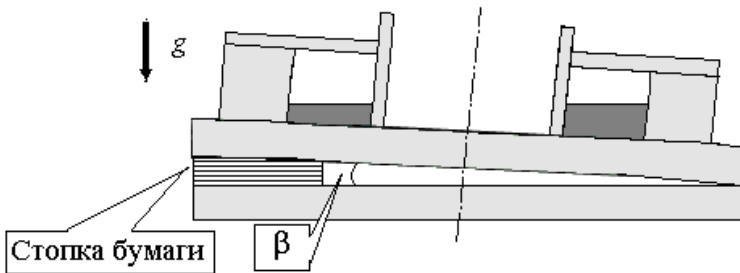


Рис. 4. Схема способа задания начального возмущения жидкого кольца

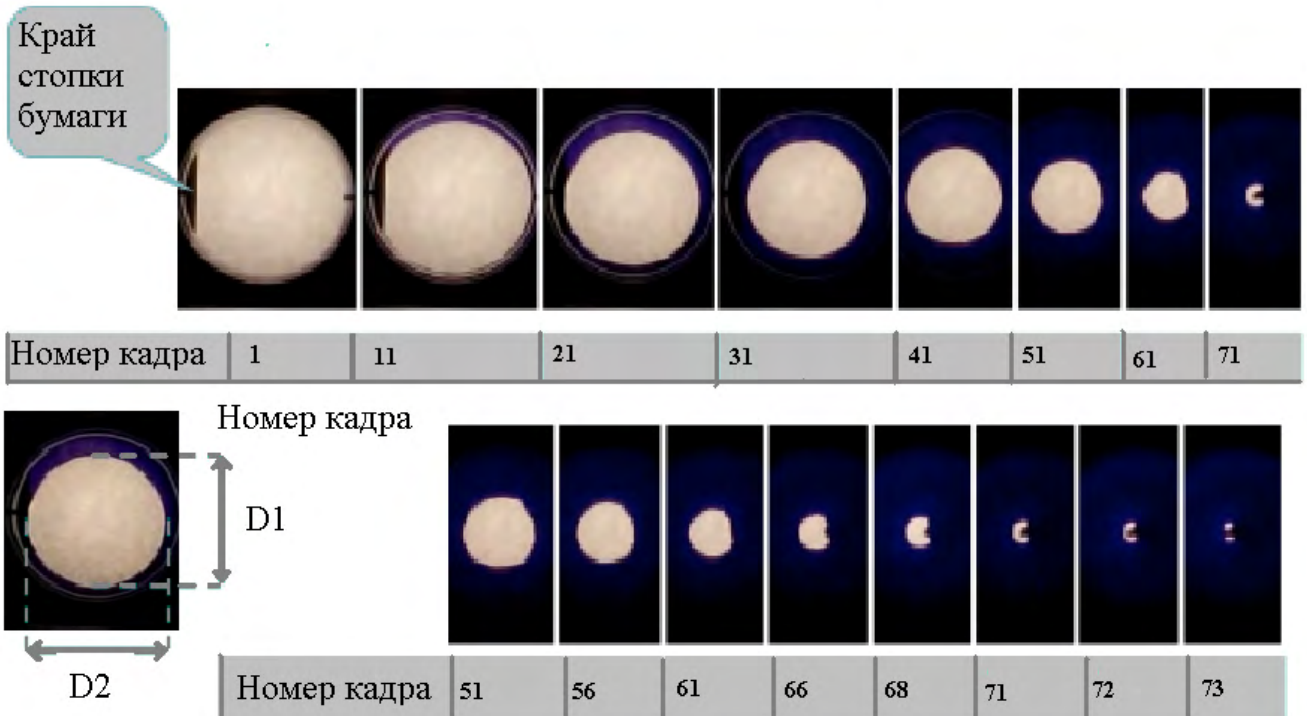


Рис. 5. Кадры видеогаммы опыта с начальным возмущением при $\beta = 1,63^\circ$ (видеосъемка со скоростью 480 кадров в секунду; $h = 14$ мм)

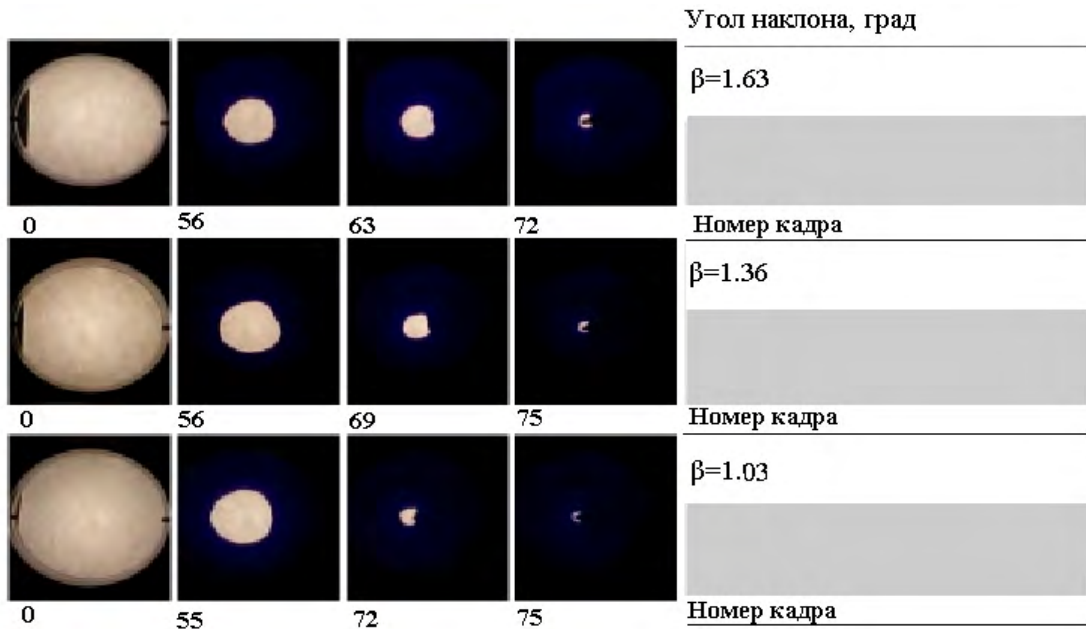
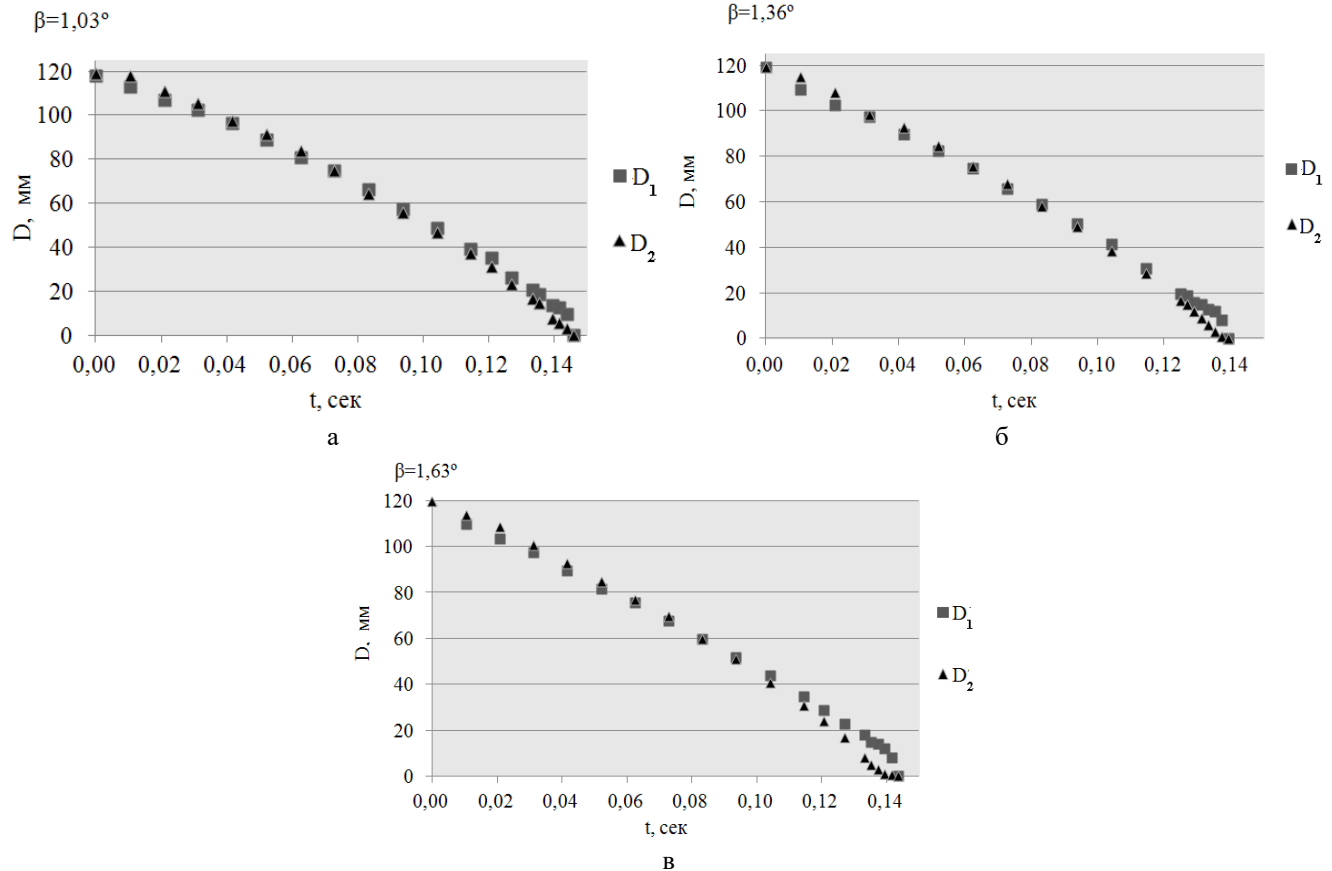


Рис. 6. Изменение конфигурации полости в опытах с различными углами наклона установки

3. Горизонтальная кумулятивная струя начинает формироваться тем раньше и развивается тем дольше (так как длительность опытов примерно одинакова), чем больше угол наклона.

На рис. 7 представлены графики зависимостей диаметров внутренней границы сходящегося тече-

ния D_1 и D_2 от времени в опытах с различным углом β . Отметим, что до момента времени $t \approx 0,1$ с возмущение практически не влияет на симметрию течения ($D_1 \approx D_2$), а потом начинает развиваться асимметрия ($D_1 \neq D_2$).

Рис. 7. Зависимость диаметров D_1 и D_2 от времени при $\beta = 1,03^\circ$ (а), $\beta = 1,36^\circ$ (б), $\beta = 1,63^\circ$ (в)

Для наглядного сравнения характера течения при наличии начального возмущения с течением при $\beta = 0$ (см. рис. 3) на рис. 8 представлены аппроксимации зависимости параметров D_1 и D_2 от времени в виде $\ln D = \alpha \cdot \ln(t_f - t) + b$. На приведенных на рис. 8 графиках эта зависимость построена для диапазона времени, когда симметрия течения еще заметно не была нарушена (от $t = 0$ до $t \approx 0,1$ с). До начала развития асимметрии течения (т. е. пока $D_1 \approx D_2$), возмущение практически не влияет на кумуляцию, причем в опытах с начальным возмущением значение показателя $\alpha = 0,79, 0,8$ и $0,81$ (напомним: в соответствующем опыте с $\beta = 0$ значение показателя $\alpha = 0,78$).

Таким образом, разработана простая методика создания малого начального возмущения течения в гидравлической модели цилиндрической имплозии путем наклона установки на малый угол (и создания тем самым разнотолщинности жидкого кольца).

Экспериментально показано, что с начала и до поздней стадии течения возмущение практически не влияет на симметрию течения и кумуляцию.

Время начала нарушения симметрии от угла наклона установки практически не зависит.

Прекращение кумуляции (образования кумулятивной струи) происходит тем позже, чем меньше угол наклона.

Список литературы

1. Lord Rayleigh On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // Phil. Mag. 1917. Vol. 34. P. 94–98.

2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.

3. Огородников Л. Л. Лабораторная модель для изучения цилиндрической имплозии // Сб. тезисов

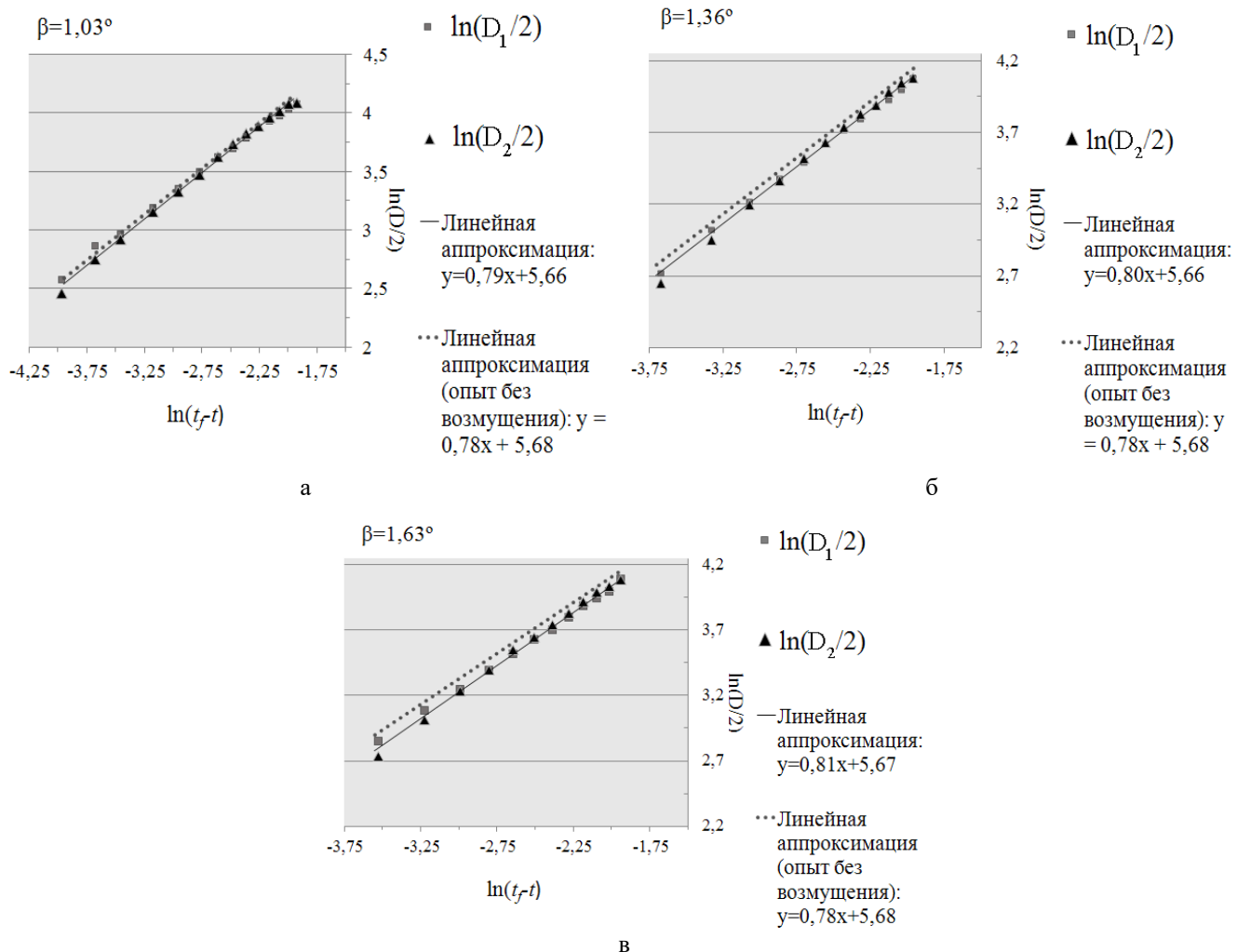


Рис. 8. Зависимость диаметров D_1 и D_2 от времени логарифмических координатах при $\beta = 1,03^\circ$ (а), $\beta = 1,36^\circ$ (б) и $\beta = 1,63^\circ$ (в)

конференции XII Школьные Харитоновские чтения. Межрегиональная олимпиада школьников «Будущие исследователи – будущее науки». 2012. С. 68.

3. Мешков Е. Е., Рэлей, Гудерлей и Леон Огородников // Атом. 2015. № 65. С. 41–46.

4. Бондаренко С. В., Георгиевская А. Б., Замыслов Д. Н., Калинин И. С., Клевцов В. А., Красовский Г. Б., Мешков Е. Е., Новикова И. А., Огородников Л. Л., Руденко В. В. Гидравлическая модель цилиндрической имплозии // Физическое образование в ВУЗах. 2016. Т. 22, № 2. С. 85–94.

5. Камчибеков М. Д., Мешков Е. Е., Грязева Е. М., Новикова И. А. Экспериментальное исследование гидравлической модели цилиндрической

имплозии // Сб. тезисов докл. конференции XVIII Харитоновские Научные Чтения. 2017. С. 215.

6. Беспалов Д. С. Изучение работы гидравлической модели цилиндрической имплозии // Сб. тезисов конференции XVII Школьные Харитоновские чтения. Межрегиональная олимпиада школьников «Будущие исследователи – будущее науки». 2017. С. 41–42.

7. Bepalov D. S., Gryazeva E. M., Kudryavtsev A. Y., Meshkov E. E., Novikova I. A., Repin A. S. About the possibility of cumulation stability investigation on the hydraulic model of cylindrical implosion // Abstracts of Sixth International Conference Turbulent Mixing and Beyond. Trieste, Italy. 14–18 August 2017. P. 100.