

УДК 532.62:532.59

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ГРАВИТАЦИОННОМ СТЕКАНИИ РИВУЛЕТОВ ПО НИЖНЕЙ СТОРОНЕ НАКЛОННОЙ ПЛАСТИНЫ

Дехтярь Руслан Анатольевич,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории процессов переноса
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1. E-mail: dekhlyar@itp.nsc.ru

Накоряков Владимир Елиферьевич,

академик РАН, Советник РАН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1.
E-mail: nakve@itp.nsc.ru

Овчинников Валерий Викторович,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории процессов переноса
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1. E-mail: avks@itp.nsc.ru

Слесарева Екатерина Юрьевна,

инженер лаборатории процессов переноса Института теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. Ак. Лаврентьева, 1. E-mail: styuardessa@yandex.ru

Актуальность обусловлена использованием течения пленок жидкости в теплообменниках различного оборудования (парогенераторы угольных электростанций, компрессоры бурильных установок, абсорберы, дистилляционные колонны, тепловые насосы и др.). Наряду с поисками и освоением традиционных источников (газ, нефть) перспективным направлением является использование энергии, накапливаемой в водоемах, грунте, геотермальных источниках, технологических выбросах (воздух, вода, стоки и др.) и ее преобразование в тепло с помощью тепловых насосов. В настоящее время тепловые насосы являются энергетически эффективным отопительным оборудованием.

Цель работы: обоснование выбора расчетных моделей и программ для распределительных устройств подачи раствора абсорбента на основании экспериментальных данных по течению ривулетов на гидрофобной поверхности при различной ориентации нормали пластины по отношению к вектору силы тяжести; определение условий, при которых происходит изменение формы ривулета, изменение направления движения жидкости; тестирование распределительных устройств, обеспечивающих стабилизацию течения для нестационарно меандрирующего ривулета.

Методы исследования: метод визуализации режимов течения с помощью скоростной видеосъемки течения ривулетов по наклонной поверхности. Используя методы цифровой обработки видео материалов, определяются параметры движения (размеры, скорость, ускорение) различных видов возмущений вдоль ривулета.

Результаты. Получены экспериментальные данные режимов течения ривулетов по нижней стороне наклонной пластины. Определены факторы, приводящие к меандрированию ривулета. Полученные данные позволяют проводить тестирование вычислительных программ на предмет адекватности результатов расчетов. Опробована схема стабилизации течения жидкости в режиме меандрирующего ривулета с использованием малорасходного капельного устройства.

Ключевые слова:

Режимы течения, меандрирование, ривулет, капли, гидрофобная поверхность.

Введение

Использование пленок жидкости в разных отраслях промышленности, в абсорберах, конденсаторах, теплообменниках делает актуальными исследования пленочных течений для проектирования парогенераторов угольных электростанций, компрессоров бурильных установок, дистилляционных колонн, тепловых насосов и т. д. [1–5]. Наряду с поисками и освоением традиционных источников (газ, нефть) перспективным направлением является использование энергии, накапливаемой в водоемах, грунте, геотермальных источниках, технологических выбросах (воздух, вода, стоки и др.) и ее преобразование в тепло с помощью тепло-

вых насосов [6, 7]. Поиски альтернативных источников энергии привели к изобретению устройств (тепловые насосы), которые способны аккумулировать тепло, находящееся в окружающей среде (водоемах, грунте, геотермальных источниках, технологических выбросах (воздух, вода, стоки и др. – все, что в той или иной степени может удовлетворить потребности в нагреве теплоносителя для системы отопления и ГВС)).

Структура течения пленки влияет на локальные и средние характеристики теплопереноса. Характер течения определяется свойствами жидкости, удельным расходом, свойствами подложки, касательным напряжением на межфазной

поверхности, наличием линии трехфазного контакта «жидкость – твердое тело – газ». При разрушении сплошного пленочного течения образуются ривулеты. Ривулет – отдельная струйка жидкости, ограниченная двумя контактными линиями [8–10]. При малых расходах наблюдается распад ривулета на капли. Ривулет является наиболее вероятным видом течения при стекании жидкости по плохо или неоднородно смачиваемой поверхности [11].

Ривулет движется непредсказуемым способом в виде змейки, поэтому невозможно получить однозначно траекторию движения [8]. Для течения ривулетов определены следующие характерные режимы: капельный, стационарно меандрирующий и нестационарно меандрирующий [9], и справедливы те же законы движения, что и для струйных течений. Для широкого диапазона чисел Рейнольдса, ривулетным течениям присущи такие же, как и для струй, виды возмущений: синусоидальное и «варикозное» [12].

Для течения ривулетов имеется большое количество экспериментальных данных и теоретических исследований [13–20]. В основном они получены для верхней стороны пластины (положительный угол наклона) или вертикальных поверхностей, которые могут быть как изотермические, так и неизотермические [13, 14]. Для переходных режимов течения ривулетов на нижней стороне наклонной пластины количество данных ограничено. Так, в работе [20] представлены результаты экспериментального исследования регулярных волновых режимов на нижней стороне наклонного цилиндра. Отмечено, что на поверхности ривулетов развиваются естественные волны в отличие от течения ривулета по вертикальной поверхности.

Для обеспечения надежности работы теплообменных устройств необходимы адекватные модели движения ривулетов по теплообменной поверхности различной формы, в том числе для переходных режимов течения при смене тепловых нагрузок. Для практики очень важно уметь управлять поведением ривулета. Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования особенностей движения ривулетов на нижней стороне наклонной гидрофобной поверхности, изучение особенностей движения жидкости в ривулете при смене режима течения.

Методика эксперимента

На рис. 1 показана принципиальная схема экспериментальной установки. Гладкая полиэтиленовая пластина – 1 имела длину 1400 мм и ширину 300 мм. Сосуд Мариотта – 2 позволял поддерживать постоянный расход жидкости на выходе распределительного устройства. Расход регулировался при помощи вентиля – 3. Распределительное устройство состояло из двух полиэтиленовых подающих трубок – 4 с внутренним диаметром 0,8 мм. Трубки располагались перпендикулярно поверхности пластины – 1 на расстоянии 10 мм

друг от друга по центру пластины. Зазор между поверхностью пластины и срезом подающих трубок не превышал 0,5 мм. Расход жидкости измерялся объемным способом. Для этого цифровым фотоаппаратом 5 проводилась видеосъемка процесса заполнения калиброванного сосуда 6 (40 мл) со скоростью 60 кадров в секунду. Угол наклона поверхности пластины θ составлял относительно вертикали 14° . С помощью цифровых видеокамер – 7 проводилась в разных по высоте сечениях фото-видеосъемка картин течения на нижней стороне пластины. Видеосъемка проводилась со скоростью до 1200 кадров в секунду. Координата Y вдоль пластины отсчитывалась от нижней кромки пластины.

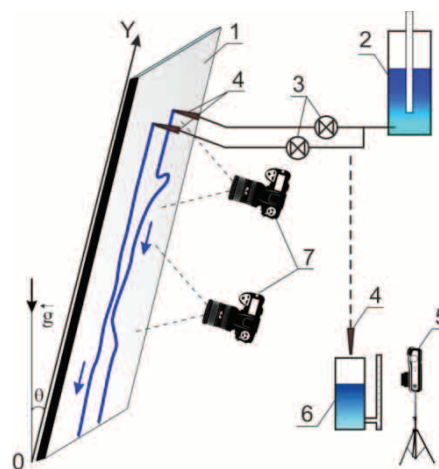


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – гладкая пластина, 2 – сосуда Мариотта, 3 – вентиль, 4 – подающая трубка, 5 – цифровой фотоаппарат, 6 – калиброванный сосуд, 7 – скоростная цифровая видеокамера

Fig. 1. Diagram of the experimental unit: 1 – flat plate, 2 – Mariotte vessel, 3 – valve, 4 – feed tube, 5 – digital camera, 6 – rated vessel, 7 – speed digital video camera

Исследовалось стекание ривулета по нижней стороне пластины под действием силы тяжести, а также взаимодействие двух рядом стекающих ривулетов. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Расход жидкости изменялся от $0,01$ до $1,0$ мл·с⁻¹ и поддерживался постоянным в каждом эксперименте. Постоянство расхода контролировалось до и после проведения эксперимента. При этом точность измерения расхода составляла $0,002$ мл·с⁻¹. Масса капель на поверхности определялась весовым методом. Гигроскопической ваткой на поверхности собирались несколько капель примерно одного размера. После взвешивания определялась разность веса сухой и влажной ватки, что позволяло определить среднюю массу капель.

В ходе эксперимента производилась фото-видеосъемка картин течения с помощью цифровых видеокамер – 7. Видеосъемка производилась со скоростью: 60, 300, 600 и 1200 кадров в секунду при разрешении кадра 1920×1080 , 512×384 ,

432×192, 336×96, соответственно. Значения скорости видеосъемки определялись при съемке экрана электронного секундомера с точностью до 0,1 кадра в секунду. В результате обработки видеоматериалов определены скорости и ускорения движения отдельных структур, которые можно выделить визуально на ривулете. Для определения амплитудно-частотных характеристик использовался метод быстрого Фурье преобразования. При анализе использовались массивы из 4096 точек. Безразмерная амплитуда пульсаций нормировалась по условию, что сумма всех амплитуд равна 100.

Результаты и обсуждения

При течении жидкости по нижней стороне гладкой гидрофобной наклонной пластины в зависимости от расхода на выходе из подающей трубки, так же как и в работе [9], наблюдаются следующие режимы течения потока: капельный, стационарно меандрирующий и нестационарно меандрирующий. Дополнительно к указанным режимам можно выделить режим прямооточного ривулетного течения. На нижней стороне наклонной пластины карта режимов течения ривулета отличается от карты режимов на верхней стороне, представленной в работе [9]. Для течения ривулета на нижней стороне пластины увеличивается амплитуда гистерезиса по величине расхода: при одном расходе могут существовать два режима течения. При некоторых расходах можно выделить три режима течения в зависимости от уровня малых фоновых возмущений на выходе подающей трубки. В капельном режиме частота формирования капель меньше 5 Гц. Объем капель перед отрывом достигает 0,05 мл. При расходах, соответствующих капельному или стационарно меандрирующему режиму течения, выделяются:

- капельно-ривулетный, когда на начальном участке – капельный режим, а ниже по течению – непрерывный поток жидкости. Изменение частоты отрыва капель или их размеров приводит к смене режима на капельный или ривулетный. На гидрофильной подложке капельно-ривулетная структура не наблюдалась.
- ривулетно-капельный, когда на начальном участке после выхода из подающей трубки формируется стационарный меандрирующий поток, а ниже по течению – капельный режим. При увеличении расхода около подающей трубки вместо капель формируется пленка жидкости в виде окружности (эллипса) с кольцеобразным валиком (утолщением) по периметру. На нижнем краю кольца образуется область слива и начинается ривулет с винтообразной формой поверхности.
- режим течения при расходах, соответствующих капельному режиму, когда, начиная с участка около подающей трубки, на подложке формируется узкая сплошная смоченная полоса, по которой скатываются небольшие капли.

В этом режиме на выходе из подающей трубки с большой частотой формируются мелкие возмущения каплеобразной формы (варикозное возмущение). Смоченная полоса образуется в нестационарном режиме в момент подачи жидкости, как объединение протяженных следов от капель. След представляет собой практически неподвижную пленку жидкости малой толщины. В этом режиме «капли» могут догонять ниже скатывающиеся «капли», а те, в свою очередь, могут догонять обогнавшие их «капли», поэтому в нижней зоне подложки наблюдается усиление амплитуды колебаний. На невозмущенных участках «капля» движется с ускорением от 8 до 9,6 м·с⁻². Капли, двигающиеся с ускорением, оказывают стабилизирующее влияние на поперечные (по оси X) искривления смоченной полосы.

Варикозные возмущения двигаются с ускорением на начальном этапе их существования. Затем из-за трения происходит стабилизация скорости движения «варикоза» и уменьшение их объема. Так как скорость движения центра варикозного возмущения может отличаться от скорости потока жидкости в ривулете, то при изменении размеров области, занятой варикозным возмущением, возможно изменение расхода жидкости в ривулете ниже по течению от зоны варикозного возмущения. При увеличении области возмущения увеличивается масса жидкости в зоне варикозного возмущения и соответственно расход в ривулете уменьшается, а при уменьшении «варикоза» расход увеличивается.

При течении ривулета на нижней стороне пластины режим нестационарного меандрирования может существовать при расходах ниже, чем стационарно меандрирующий. При этом наблюдается разрыв течения в точке изменения направления течения. На рис. 2 показаны отдельные кадры видеосъемки (1200 кадров в секунду) такого режима. На кадрах видно, как происходит изменение кривизны ручейка вдоль течения из-за взаимодействия возмущений (варикозное возмущение) с ниже текущим основным течением. На рисунке также отмечены основные особенности (A , B , C и a), для которых на рис. 3 приведены зависимости изменения положения этих особых точек от времени.

Одной из причин изменения формы ривулета в этом случае является тот факт, что расход жидкости по длине ривулета непостоянен, а вариации расхода соизмеримы с величиной расхода из подающей трубки. Тогда как обычно в моделях предполагается постоянный расход по всей длине течения ривулета и на радиус кривизны влияют силы поверхностного натяжения. Например, в [18] меандрирование описывается как режим синусоидальной неустойчивости, а нестационарно меандрирующий – как режим с нарастающей амплитудой. То есть для моделирования течения в ривулете нужно понимание того, как происходит движение таких возмущений вдоль потока. Напри-

мер, когда жидкость накапливается на нижней границе ривулета, то расход ниже ривулета равен нулю. А когда начинается движение нижней границы ривулета, то расход жидкости в некоторых сечениях может превышать расход на входе из подающей трубки. Таким образом, форма сечения по длине ривулета сложным образом зависит от расхода на выходе из подающей трубки. Скорость движения варикозных возмущений вдоль вертикали порядка $0,4-0,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а вдоль горизонтали – до $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (рис. 3). Также можно проследить, как нарастает «синусоида», из которой потом возникает «капля». При определенных условиях на струе образуется каплеобразная структура, на которой формируется точка разрыва. При небольших размерах такой капли она работает как точка изменения кривизны струи: у одной части потока около этой точки кривизна увеличивается, а у другой уменьшается.

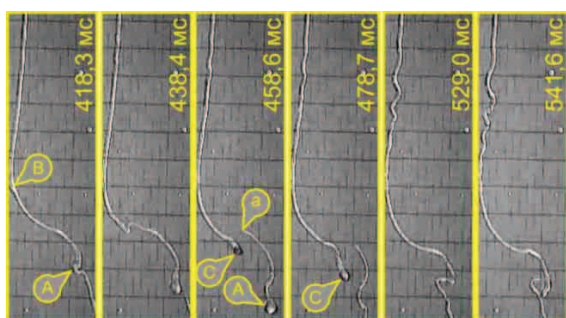


Рис. 2. Кадры видеосъемки течения ривулета. Влияние возмущений на форму ривулета $q_0=0,5 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$. Участок 1,22–1,11 м. На кадрах указано время от момента подачи жидкости в подающую трубку. А, В, С и а – геометрические особенности ривулета

Fig. 2. Video frames of rivulet flow. Effect of perturbation on rivulet form is $q_0=0,5 \text{ ml}\cdot\text{с}^{-1}$. Section is 1,22–1,11 m. The frames shows the time from the moment of liquid supply into the feed tube. A, B, C and a are the rivulet geometrical features

Для случая течения на нижней стороне наклонной пластины имеется другой возможный механизм, приводящий к нестационарному меандрированию. «Варикозы» создают силу, направленную от стенки к свободной поверхности, поскольку поперечная неустойчивость контактной линии приводит к формированию вниз по потоку ривулетного течения и, соответственно, меняет режим течения жидкости в целом. Это способствует оттоку жидкости от стенки и может приводить к осушению ривулета. Изменение направления течения ривулета затем происходит по капельно-ривулетному режиму. По мере роста концевой «капли» на поверхности капли образуются «языки» от волн возмущения на ривулете. Направление движения определяется случайным образом в зависимости от того, какой из «языков» станет началом непрерывного ривулета (рис. 2).

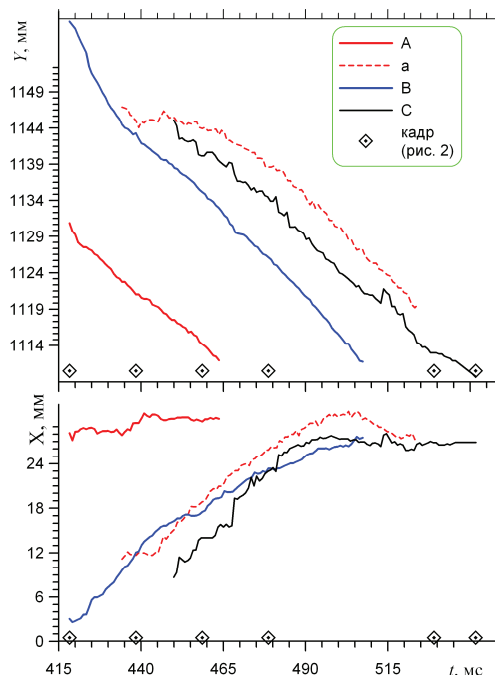


Рис. 3. Изменение положения наблюдаемых особенностей А, В, С и а (рис. 2) для координат Y, X от времени t

Fig. 3. Change in position of the observed features A, B, C and a (Fig. 2) for the coordinates Y, X on time t

Характерный размер и масса «варикозы» соизмеримы с размерами и массой капель на поверхности, остающихся там при движении и меандрировании ривулета. Масса крупных капель m – порядка 3–4 мг. Мелких – порядка 1 мг (на верхней стороне пластины эта величина порядка 20–50 мг). Значение малого расхода соответственно можно оценить как $q \approx m/\rho \cdot f$, где ρ – плотность жидкости, f – характерная частота образования «варикозов», f не выше 5 Гц (частота образования концевых капель) и тогда имеем $q \approx 5-20 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$. В этом случае пульсации расхода соизмеримы с начальным расходом и возможен разрыв ривулета. При более высоких расходах разрыв не происходит, но изменение направления течения происходит по «варикозному» механизму.

В эксперименте наблюдался другой вариант перераспределения потоков. Например, сильные возмущения, возникающие вверх по потоку и приходящие в точку раздвоения, вызывают перераспределение потока в пользу рукава с меньшим расходом и формируют новый рукав. А также возможно формирование точки раздвоения на нижней границе нового рукава ривулета конечной длины. В режиме нестационарного меандрирования на ривулете существуют одна или более точек раздвоения. Замечено, что точки раздвоения, как правило, образуются из каплеобразных структур, которые представляют собой участки, где наблюдается увеличение высоты профиля и расширение ривулета. Каждая из каплеобразных структур по длине ривулета имеет свою независимую фазу роста. В ко-

начной фазе роста происходит срыв каплеобразной структуры и ее ускоренное движение вниз по потоку в виде скользящей капли. Когда каплеобразных структур мало, тогда почти все капли находятся в начальной фазе роста. В этом случае скользящая капля может поглощать другие капли, и после ее прохождения не остается каплеобразных структур по длине ривулета. Если каплеобразных структур много, то на ривулете может быть несколько капель в последней фазе роста. Каплеобразная структура, которая находится в последней фазе роста, в результате взаимодействия со скользящей каплей может стать точкой раздвоения или точкой изменения направления движения ривулета.

Таким образом, стационарно меандрический или нестационарный меандрический режим течения зависит от числа каплеобразных структур по длине ривулета, и с превышением критического числа этих структур режим течения ривулета пе-

реходит из стационарного в нестационарно меандрирующий.

Существует переходная область расходов, в которой режим стационарно или нестационарно меандрирующий определяется длиной ривулета, так как число каплеобразных структур пропорционально длине ривулета. Для такого расхода жидкости существует определенная длина участка, на котором ривулет остается стационарно меандрирующим.

Для проверки гипотезы о роли неравномерности расхода жидкости вдоль ривулета на процесс меандрирования, проведены качественные опыты. Цель опытов – воздействие на варикозное возмущение таким образом, что бы компенсировать уменьшение расхода в точке изменения направления течения и вызвать «срыв» пальцеобразных структур раньше, чем начнется нарастающий рост одного из «пальцев». Для этого было организовано взаимодействие

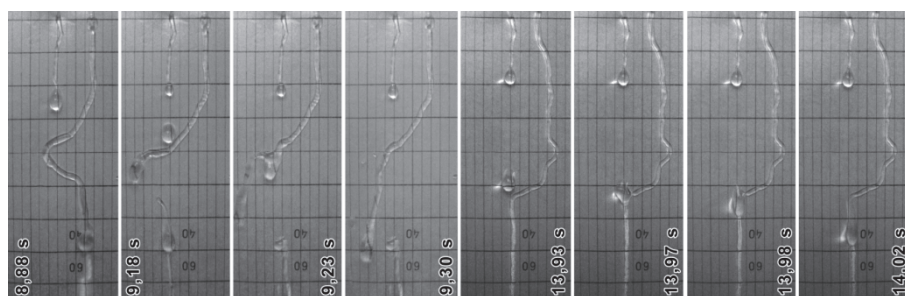


Рис. 4. Кадры видеосъемки формирования взаимодействия двух ривулетов. Расход $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ (слева), $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ (справа). На кадрах указано время от момента подачи жидкости в подающие трубки

Fig. 4. Video frames of two rivulets interaction formation. Consumption $q_1=0,530 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ (left), $q_2=0,053 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ (right). The frames show the time from the moment of liquid supply into the feed tubes

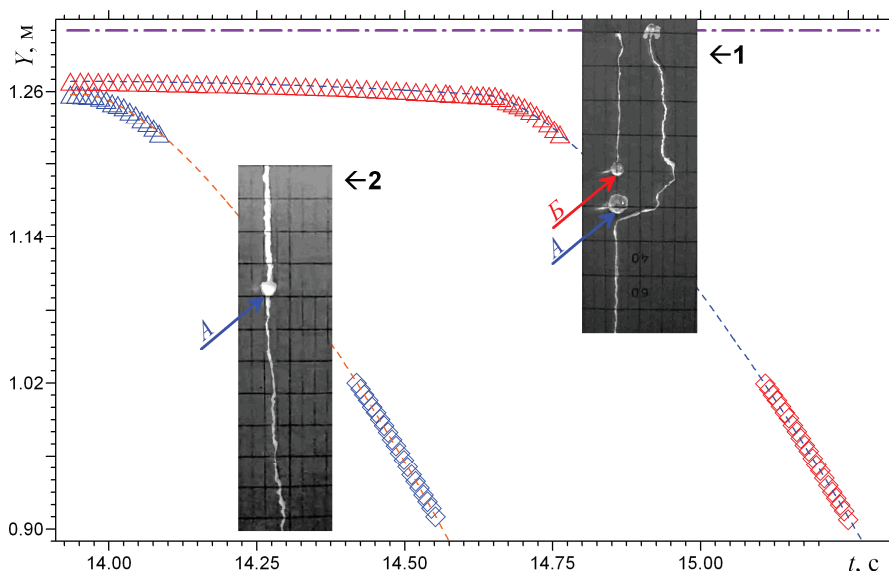


Рис. 5. Изменение положения на ривулете (расход $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$) нижней границы «капли» (А, Б), образующейся на краю малорасходного ривулета (расход $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$). 1 – верхний участок 1,32–1,20 м, 2 – нижний участок 1,03–0,91 м. Штрихпунктирная линия – расположение подающей трубки – 1,31 м

Fig. 5. Change of position of the «drop» (А, Б) lower bound on rivulet (consumption is $q_1=0,530 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$). The «drop» is formed on the edge of the low emission rivulet (consumption is $q_2=0,053 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$). 1 is the upper area 1,32–1,20 m, 2 is the lower area 1,03–0,91 m. Dash-and-dot line is the position of the feed tube – 1,31 m

нестационарно-меандрирующего ривулета с ручейково-капельным. На рис. 4 видно как происходит взаимодействие двух ривулетов с отличными режимами течения. В течение 6–7 секунд формируется нестационарно-меандрирующий ривулет. В результате взаимодействия капля от малорасходного ривулета с нестационарно-меандрирующим через пять секунд ниже точки взаимодействия формируются прямоточное ривулетное течение.

Ускорение движения варикозного возмущения изменялось от $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ в точке соединения до $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ в нижней части пластины. Частота отрыва капля от ривулета – порядка 2,5 Гц. На рис. 5 показано изменение положения на ривулете с расходом $q_1=0,530 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$ нижней границы капли (А, Б), образующейся на краю малорасходного ривулета с расходом $q_2=0,053 \text{ мл}\cdot\text{с}^{-1}$. Видеосъемка проводилась для двух участков по длине пластины от расположения подающей трубки (1,31 м), первый участок 1,32–1,20 м, второй 1,03–0,91 м. Видно, что до соприкосновения с основным ривулетом капля Б медленно сползает по подложке. После слияния капля А или Б с ривулетом скорость «капли» резко увеличивается. Однако по мере движения «капли» по ривулету ускорение скольжения уменьшается с 4 до $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. Капли оказывают

стабилизирующее действие на меандрирующий ривулет не только ниже точки слияния, но и выше. То есть возмущения, возникающие на ривулете, оказывают свое влияние и вниз, и вверх по течению струи. Таким образом, ускоренное движение «капли» оказывает стабилизирующее влияние на меандрирующий ривулет. Этот пример показывает, что понимание механизмов, определяющих характер движения ривулета, помогает управлять режимами течения ривулетов.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование течения ривулетов и каплей по нижней стороне наклонной гидрофобной поверхности. Показано, что для капельного и ривулетно-капельного режима при условии постоянного расхода на выходе из подающей трубки направление движения и форма ривулета зависят от неравномерности расхода. Непостоянство расхода жидкости по длине ривулета наблюдалось и в других режимах. Показано, что одним из вариантов возникновения нестационарного меандрирования является изменение расхода в различных сечениях по длине ривулета. Режим течения ривулета может быть изменен при взаимодействии с другим ривулетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Heat and mass transfer intensification at stream absorption by surfactant additives / V.E. Nakoryakov, N.I. Grigoryeva, N.S. Bufetov, R.A. Dekhtyar // *International Journal Heat and Mass Transfer*. – 2008. – V. 51. – № 21–22. – P. 5175–5181.
- Логинов В.С., Озерова И.П. Оценка нестационарной теплоотдачи при пленочной конденсации пара на вертикальной стенке // *Известия Томского политехнического университета*. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 67–69.
- Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. Исследование неизотермической сорбции при переменной толщине сорбента // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – 2012. – Т. 10. – № 2. – С. 246–250.
- Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Boiling Crisis in Droplets of Ethanol Water Solution on the Heating Surface // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2013. – V. 22. – № 1. – P. 1–6.
- Саломатов В.В. Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных парогенераторов под вихревую технологию сжигания // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324 – № 4. – С. 25–37.
- Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 256 с.
- Огуречников Л.А. Математическое моделирование процесса внутритрубного кипения неазеотропных смесей в испарителе пароконденсационного теплового насоса // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2010. – Т. 82. – № 2. – С. 31–35.
- Towell G.D., Rothfeld L.B. Hydrodynamics of rivulet flow // *AIChE Journal*. – 1966. – V. 12. – № 5. – P. 972–980.
- Nakagawa T., Scott J.C. Stream meanders on a smooth hydrophobic surface // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1984. – V. 149. – P. 89–99.
- Myers T.G., Liang H.X., Wetton B. The stability and flow of a rivulet driven by interfacial shear and gravity // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2004. – V. 39. – P. 1239–1249.
- Gennes P.G. Wetting, statics and dynamics // *Review Modern Physics*. – 1996. – V. 57. – № 3. – P. 827–863.
- Перепелица Б.В. Визуализация потока при истечении круглой струи в узкий канал // *Сборник трудов XXIII семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям (с международным участием)*. – Томск, 2012. – С. 293–297.
- Kuznetsov V.V., Vitovskii O.V., Krasovskii V.A. An experimental investigation of modes of flow under conditions of evaporation of liquid on a vertical heating surface // *High Temperature*. – 2007. – V. 45. – № 2. – P. 77–84.
- Актершев С.П., Алексеенко С.В. Волновое течение испаряющейся пленки жидкости // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324 – № 4. – С. 6–14.
- Козлобродов А.Н. Стеkanie пленки нелинейной вязкоупругой жидкости по боковой поверхности кругового цилиндра // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 182–185.
- Trifonov Yu.Ya. Viscous film flow down corrugated surfaces // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2004. – V. 45. – P. 389–400.
- Trifonov Yu.Ya. Viscous liquid film flows over a vertical corrugated surface and the film free surface stability // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2000. – V. 10. – № 2. – P. 129–145.
- Bruinsma R. The statistical mechanics of meandering // *Journal de Physique*. – 1990. – V. 51. – № 9. – P. 829–845.
- Актершев С.П., Алексеенко С.В. Волновое течение вертикального ривулета // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41. – Вып. 1. – С. 50–56.
- Alekseenko S.V., Bobylev A.V., Markovich D.M. Rivulet Flow on the Outer Surface of an Inclined Cylinder // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2008. – V. 17. – № 4. – P. 259–272.

Поступила 19.05.2015 г.

UDC 532.62:532.59

TRANSITIONAL REGIMES OF RIVULET GRAVITY FLOW ON THE BOTTOM SIDE OF AN INCLINED PLATE

Ruslan A. Dekhtyar,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Acad. Lavrentiev Avenue,
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: dekhtyar@itp.nsc.ru

Vladimir E. Nakoryakov,

Member of Russian Academy of Sciences, Kutateladze Institute
of Thermophysics SB RAS, 1, Acad. Lavrentiev Avenue, Novosibirsk,
630090, Russia. E-mail: nakve@itp.nsc.ru

Valeriy V. Ovchinnikov,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Acad. Lavrentiev Avenue,
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: avks@itp.nsc.ru

Ekaterina Yu. Slesareva,

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Acad. Lavrentiev Avenue,
Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: styuardessa@yandex.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to use liquid films in heat exchangers (steam generators of coal-fired power station, compressors of drilling device, absorbers, distillation columns, heat pumps etc.). Along with searches and development of traditional sources (gas, oil) the promising trend is the use of energy stored in the reservoirs, ground, geothermal sources, industrial emissions (air, water, drains, etc.) and its transformation to heat by means of thermal pumps. Now thermal pumps are energetically effective heating equipment.

The main aim of the research is to substantiate the selection of design models and programs for distributing devices of supplying absorbent solution based on the experimental data on rivulet flow on a hydrophobic surface at various orientation of a plate normal in relation to a gravity vector; to define the conditions under which the rivulet form and liquid stream direction change; to test the distributing devices, which are capable of stabilizing flow for non-stationary meandering rivulet.

The methods used in the study. The visualization of flow regimes by a high-speed video for rivulet on an inclined surface is used. Using the methods of digital processing of video frame, the parameters (size, velocity, acceleration) of various flow patterns for form deviation along rivulet are defined.

The results. The authors have obtained the experimental data of the rivulet flow regime on the bottom side of the inclined plate and determined the conditions for meandering rivulet. The data obtained allow testing the computing programs on adequacy of calculation results. The method of liquid flow stabilization at meandering rivulet is tested using the dripping device.

Key words:

Flow patterns, meandering, rivulet, drops, hydrophobic surface.

REFERENCES

1. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Heat and mass transfer intensification at stream absorption by surfactant additives. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, no. 21–22, pp. 5175–5181.
2. Loginov V.S., Ozerova I.P. Otsenka nestatsionarnoy teplootdachi pri plnochnoy kondensatsii para na vertikalnoy stenke [Estimation of a non-steady heat transfer at film vapor condensation on a vertical wall]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 67–69.
3. Nakoryakov V.E., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Issledovanie neizotermicheskoy absorbtсии pri peremennoy tolshchine absorbenta [Investigation of non-isothermal absorption by variable thickness of absorbent]. *Modern Science: researches, ideas, results, technologies*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 246–250.
4. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Boiling Crisis in Droplets of Ethanol Water Solution on the Heating Surface. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 1–6.
5. Salomatov V.V. Nauchnye osnovy sozdaniya i malozatratnoy rekonstruktsii ugolnykh parogeneratorov pod vikhrevuyu tekhnologiyu szhiganiya [Scientific foundations of development and low-cost reconstruction of coal steam generators for vortex combustion technology]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 25–37.
6. Alkhasov A.B. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable Energetics]. Moscow, Fizmatlit, 2012. 256 p.
7. Ogurechnikov L.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessy vnutritrubnogo kipeniya neazeotropnykh smesey v isparitele parokompressionnogo teplovogo nasosa [Mathematical modeling of intratubal boiling of non-azeotropic mixtures in evaporator of vapor-compression heat pump]. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2010, vol. 82, no. 2, pp. 31–35.
8. Towell G.D., Rothfeld L.B. Hydrodynamics of rivulet flow. *AIChE Journal*, 1966, vol. 12, no. 5, pp. 972–980.
9. Nakagawa T., Scott J.C. Stream meanders on a smooth hydrophobic surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, vol. 149, pp. 89–99.
10. Myers T.G., Liang H.X., Wetton B. The stability and flow of a rivulet driven by interfacial shear and gravity. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2004, vol. 39, pp. 1239–1249.
11. Gennes P.G. Wetting, statics and dynamics. *Review Modern Physics*, 1996, vol. 57, no. 3, pp. 827–863.
12. Perepelitsa B.V. Vizualizatsiya potoka pri istechenii krugloy strui v uzkiy kanal [Visualization of a stream at the expiration of

- a round stream to the narrow channel]. *Sbornik trudov XXIII seminara po struynym, otryvnyim i nestatsionarnym techeniyam (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Proc. XXIII All-Russian Seminar with international partnership on jet, separation, and non-stationary flows], Tomsk, 2012, pp. 293–297.
13. Kuznetsov V.V., Vitovskii O.V., Krasovskii V.A. An experimental investigation of modes of flow under conditions of evaporation of liquid on a vertical heating surface. *High Temperature*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 77–84.
 14. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Volnovoe techenie isparayushcheyasya plenki zhidkosti [Wave flow of the evaporating liquid film]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 6–14.
 15. Kozlobrodov A.N. Stekanie plenki nelineynoy vyazkouprugoy zhidkosti po bokovoy poverkhnosti krugovogo tsilindra [Film sintering of nonlinear viscous-elastic liquid on lateral surface of circular cylinder]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 182–185.
 16. Trifonov Yu.Ya. Viscous film flow down corrugated surfaces. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2004, vol. 45, pp. 389–400.
 17. Trifonov Yu. Ya. Viscous liquid film flows over a vertical corrugated surface and the film free surface stability. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2000, vol. 10, no. 2, pp. 129–145.
 18. Bruinsma R. The statistical mechanics of meandering. *Journal de Physique*, 1990, vol. 51, no. 9, pp. 829–845.
 19. Aktershev S.P., Alekseenko S.V. Volnovoe techenie vertikalnogo rivuleta [Wave flow of a vertical rivulet]. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, iss. 1, pp. 25–28.
 20. Alekseenko S.V., Bobylev A.V., Markovich D.M. Rivulet Flow on the Outer Surface of an Inclined Cylinder. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, vol. 17, no. 4, pp. 259–272.

Received: 19 May 2015.