

УДК 625.717:681.17

Ю.Н. КРИВЕНКО, кандидат технических наук
А.А. БЕЛЯТЫНСКИЙ, доктор технических наук
Национальный авиационный университет

ОСОБЕННОСТИ ПОТОКОВ МАЛОЙ ГЛУБИНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ

Наведені результати експериментальних досліджень у лабораторних та природніх умовах потоків, глибина яких складає 0,25...10 мм і порівнювана з висотами, що характеризують макронерівності поверхні покриття. Встановлено, що існуючі методи розрахунку опорів, для таких потоків дають менші за дійсні результати. Запропоновані корегуючі залежності.

Ключові слова: висота шару води, потік малої глибини – 0,25...10 мм, коефіцієнт опору, режими течії, ухил і нерівність поверхні, гісування (аквапланування).

Приведены результаты экспериментальных исследований в лабораторных и естественных условиях потоков, глубина которых составляет 0,25...10 мм и соизмерима с высотами, ха-

www.standartpark.ua

характеризующими макронеровность поверхности покрытия. Установлено, что существующие методы расчета сопротивлений для таких потоков дают заниженные результаты. Предложены корректирующие зависимости.

Ключевые слова: высота слоя воды, поток малой глубины – 0,25...10 мм, коэффициент сопротивлений, режимы течения, уклон и неровность поверхности, глиссирование (аквапланирование).

The results of experimental studies in laboratory and natural conditions of streams, whose depth is 0,25...10 mm and comparable to the heights that characterize makronerovnost the coating surface. Established that the existing methods of calculating resistances for such flows give low results. Proposed corrective dependence.

Key words: height layer water, flows small depthon – 0,25...10 mm,, hydroplaning, aquaplaning, shallow liquid flow, depth of a water film, mode of flow, slope, surface roughness.

Вода на поверхности покрытия уменьшает сцепление пневматиков авиалайнеров с покрытием, а при достаточно больших скоростях (взлетно-посадочные скорости достигают 100...350 км/час) и сравнительно малых давлениях в пневматиках может вызвать глиссирование (аквапланирование) и выкатывание самолета за пределы концевой или боковой полос безопасности. Как указывается в материалах ИКАО [1], глиссирование может наступить при попадании пневматика в лужу глубиной порядка 3 мм и продолжаться далее при значительно более тонком слое. В аэропорту Орли на поверхности ровного, гладкого покрытия глиссирование наблюдалось даже при слое воды высотой 0,6 мм.

Особо существенно снижается сцепление при замерзании воды и возникновении гололеда. Существенное влияние воды на эксплуатацию ВПП (взлетно-посадочных полос) подчеркивается и существующими нормативами [2].

Анализ данных исследований и нормативной литературы по расчету потоков на покрытиях аэродромов [3,4] показал их недостаточность применительно к рассматриваемым условиям – потокам малой глубины порядка 0,25...10 мм, когда высота неровностей на покрытии сопоставима с высотой потока (рис. 1).

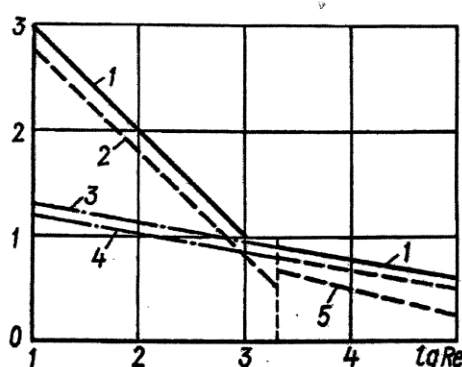


Рис.1. Сопоставление существующих методов расчета по формулам Маннинга (3) и Н.Н.Павловского (4) с теоретической зависимостью для открытых потоков (1) и ламинарных потоков в круглых трубопроводах (2). 5 – зависимость для гидравлически гладких напорных трубопроводов.

Рекомендуемые способы расчета относятся либо к турбулентным потокам значительной глубины, либо исходят из предпосылок турбулизации ламинарных потоков каплями дождя.

И на автодорогах, где скорости достигают 150 км/час и имеют четкую тенденцию к увеличению, а конструктивные скорости автомобилей значительно превышают допустимые, большинство дорожно-транспортных происшествий связано со скользкостью, со снижением коэффициента сцепления колес с покрытием [5]. Опасность снижения сцепления и глиссирования на

автодорогах становится даже большей чем на ВПП, поскольку давление в колесах легковых автомобилей часто находится около 0,2 МПа, что значительно меньше, чем в пневматиках самолетов – 0,6...1,2 МПа.

В Национальном аэрономическом университете Украины проводятся научно-исследовательские работы по созданию дистанционной автоматической системы контроля и прогнозирования состояния поверхности взлетно-посадочных полос [6], в рамках которой был предложен датчик глубины слоя воды для ВПП [7]. На рис. 2 показаны полученные с помощью этого датчика зависимости высоты слоя воды от времени в характерной точке ВПП в аэропорту Киев (Жуляны) при дождях различной интенсивности.

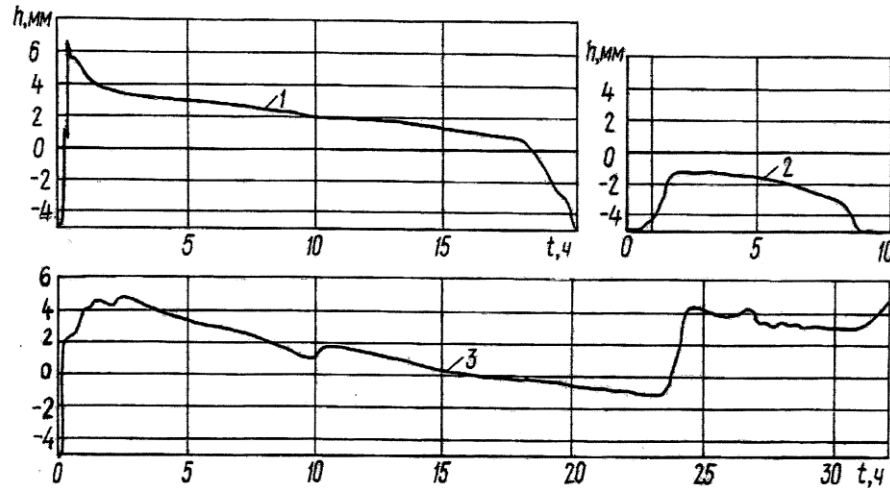


Рис.2. Зависимость глубины слоя воды от времени в характерной точке на ВПП аэропорта Киев при дождях различной интенсивности и продолжительности

Экспериментальные исследования потоков жидкости малой глубины. выполнялись для оценки состояния всего покрытия по показаниям датчиков и для определения количества датчиков,

На данном этапе проводились исследования, главным образом, для транзитных потоков, которые наблюдаются на ВПП, где длина склонов достигает 20...50 м и более. Как показали расчеты и наблюдения, в условиях Украины влияние капель дождя на поток будет существенным лишь при наибольших интенсивностях осадков и на начальных участках, где поток лишь формируется. По-видимому, влияние капель необходимо будет учитывать на начальных участках и при небольших длинах склонов. Такие условия более характерны для автодорог.

Для проведения исследований были созданы две лабораторные установки – одна в помещении и вторая на открытом воздухе. Кроме того, проводились также исследования непосредственно на действующих ВПП. Лабораторная установка (рис.3) представляет собой стальной двутавр длиной 3,7 м, на который укладывался и уплотнялся вибратором бетон слоем 40 мм. Поверхность бетона выравнивалась и железнилась цементом марки 400. Уклон лотка мог изменяться от 0 до 0,02 и фиксировался указателем 4. Вода в лоток подавалась от водопровода или, при расходах свыше 150...200 см³/с, от насоса. Глубина потока измерялась с помощью мерных игл (шпиценмасштабов) в трех указанных на рис.3 створах. Створы выбирались таким образом, чтобы исключалось влияние входных и выходных участков. Стабильность глубин и расхода в течение опыта контролировались датчиком глубины потока 11 и самопишущим прибором 12. Для качественной проверки влияния капель дождя на транзитный поток использовалась дождевальная установка 10, представлявшая собой трубопровод диаметром 20 мм с отверстиями, у которых прикреплялись специальные «усы» для формирования капель и равномерного их распределения по поверхности потока.

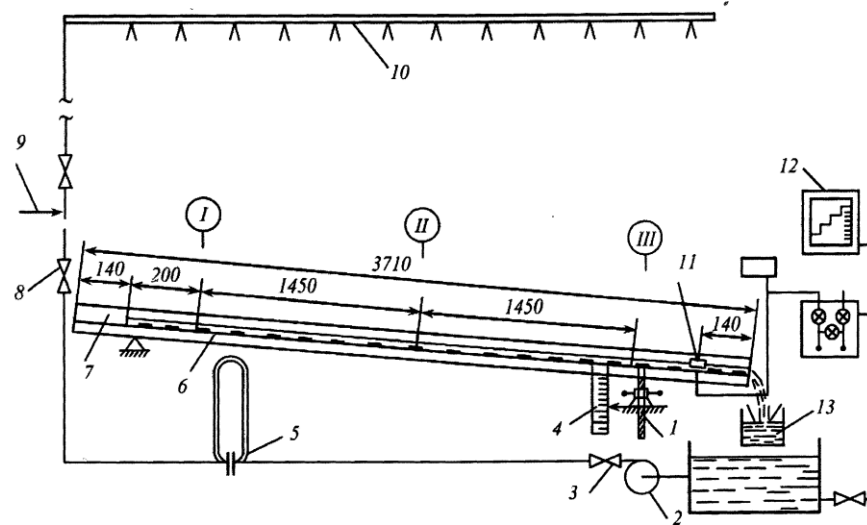


Рис.3. Схема лабораторной установки с лотком шириной 280 мм:
 1 — подъемник; 2 — насос для потоков глубиной более 5–6 мм;
 3, 8 — задвижка и вентили для регулирования расхода воды;
 4 — указатель уклона лотка; 5 — расходомер; 6 — двутавр;
 7 — успокоитель потока; 9 — подача воды из водопровода;
 10 — дождевальное устройство; 11 — датчик глубины потока воды;
 12 — регистрирующий прибор; 13 — емкость для измерения расхода воды

Установка на открытом воздухе отличалась только большими размерами (ширина потока составляла 370 мм при длине 8 м), а также отсутствием насоса и дождевальной установки. Шероховатость поверхности на этом лотке, вследствие длительного (более трех лет) влияния на бетон атмосферных осадков и морозов, была значительно большей.

Измерялась шероховатость поверхностей по рекомендациям ИКАО [1] засыпкой поверхности песком или заливкой смазочным материалом с последующим разглаживанием фиксируемого объема песка или смазки и измерением полученного отпечатка. Шероховатость бетонной поверхности лотка в лаборатории составляла в среднем 0,1 мм, а лотка на открытом воздухе — 0,4 мм.

На данном этапе проводились, в основном, исследования транзитного потока, потока без учета капель дождя, поскольку такие потоки на ВПП наблюдаются наиболее часто. Ширина ВПП достигает 40...50 м, а транзитный поток формируется в начале склона. Влияние капель дождя, вероятно, будет наиболее ощутимо на начальном участке, что станет существенным при небольших длинах склона, свойственным автодорогам. Такое влияние предполагается исследовать в будущем. Представлены результаты только одного опыта с дождем, который удалось провести. Результаты лабораторных экспериментов показаны на рис. 4. в виде зависимостей глубины потока h от расхода Q и на рис. 5 в форме зависимостей коэффициентов сопротивления λ от числа Рейнольдса (Re).

Выбор коэффициента λ , который обычно применяется для напорных потоков, вместо коэффициента Шези, широко используемого для безнапорных, русловых потоков, нам представился более удобной формой для обработки и анализа полученных результатов.

Коэффициент λ определялся по формуле Дарси в записи для плоского потока:

$$\lambda = 8ghi/V^2, \quad (1)$$

где i — уклон поверхности покрытия, V — средняя скорость потока.

Как известно, коэффициент λ связан с коэффициентом Шези C соотношением

$$C = (8g/\lambda)^{0.5}. \quad (2)$$

При проведении опытов в лаборатории мерная емкость подставлялась в конце лотка, а при проведении опытов на ВПП — в начале лотка, под трубопровод от резервуара с запасом воды.

Число Рейнольдса

$$Re = 4Vh/\nu,$$

(3)

Где ν – коэффициент кинематической вязкости.

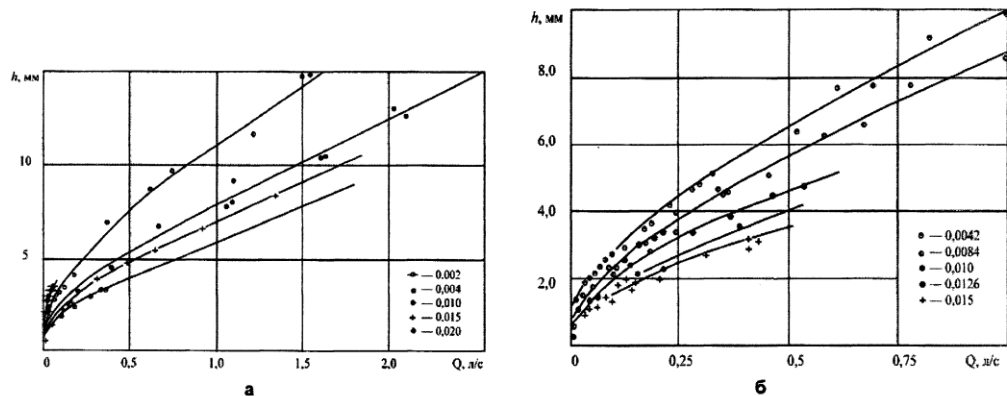


Рис. 4. Зависимости глубины потока h от расхода Q на бетонной поверхности: а – шероховатость $\Delta = 0,1$ мм, б – шероховатость $\Delta = 0,4$ мм, длительное время подвергавшаяся атмосферному воздействию. У точек указан уклон дна потока

В-
ТЬ
Р-

ТИ
Ь-
ТИ

ТА
А-
О,
ЗХ
Д-
А-
НА

И-
ЭЕ

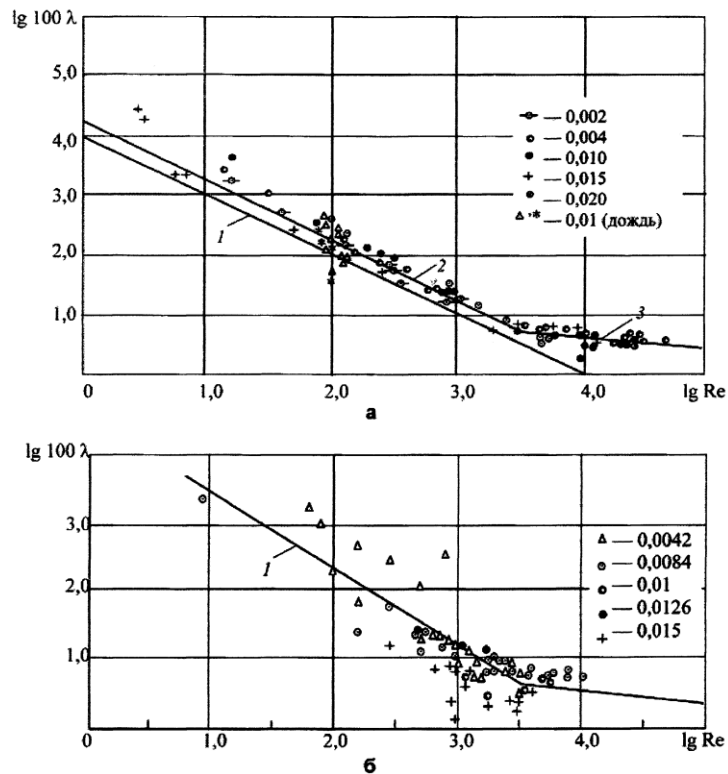


Рис. 5. Зависимости коэффициентов сопротивления λ для потоков малой глубины на бетонной поверхности от режима течения (от чисел Рейнольдса): а — шероховатость поверхности $\Delta = 0,1$ мм, 1 – линия, соответствующая обычным плоским потокам ($\lambda = 96/Re$); 2 и 3 – линии, аппроксимирующие результаты опытов при ламинарном и турбулентном течении; б — шероховатость $\Delta = 0,4$ мм (поверхность длительное время подвергалась атмосферному воздействию), 1 – линия, соответствующая гладкой поверхности с $\Delta = 0,1$ мм – линии 2 на рис.5а.

Анализ полученных результатов, а также проведенные в процессе опытов оценки ошибок измерения отдельных параметров, позволяют считать выполненные опыты достаточно достоверными. Наибольшую трудность в этих опытах представляет измерение с достаточной точностью глубины потока. Точность измерения шпигенмасштабом составляет 0,05 мм (половина цены деления шкалы прибора). Однако, в связи с неровностью самой поверхности, большое значение имеет место установки самого прибора. На лабораторном лотке места установки прибора были постоянными, как по длине лотка, так и по ширине створа.

Сначала производились измерения глубин в поперечном створе при горизонтальном расположении лотка, при глубинах порядка 3...4 мм с точностью около 0,1 мм. Затем определилась средняя высотная отметка, и над ней располагалась игла прибора. Отсчеты по шкале прибора выполнялись в момент соприкосновения иглы с ее отражением в воде. Выполнялись отсчеты, как правило, двумя наблюдателями. Естественно, при течении потока на малые глубины начинала влиять и продольная неровность поверхности, несколько искажавшая отдельные струи. Это искажение в определенной мере зависело от скорости потока. О точности полученных данных можно судить по представленным материалам.

На основании опытов в лаборатории на гладкой поверхности можно рекомендовать для расчетов глубин и скоростей потоков малой глубины следующие зависимости:

– для ламинарного течения (при $Re = 4Vh/\nu < 3000$) вместо широко известной зависимости для обычных потоков $\lambda = 96/R$ (на рис. 5а линия 1) зависимость:

$$\lambda = 167/Re, \quad (4)$$

которой на рис. 5а соответствует линия 2;

– для турбулентного течения (при $Re = 4Vh/\nu > 3000$) этой зависимости соответствует линия 3:

$$\lambda = 0,11(\Delta / 4h)^{0,25}. \quad (5)$$

Последняя формула представляет собой известную формулу Шифринсона, которая для напорных потоков в круглых трубопроводах диаметром D имеет следующий вид:

$$\lambda = 0,11(\Delta e / D)^{0,25},$$

а в трубопроводах произвольной формы с гидравлическим радиусом $R = \omega/\chi$:

$$\lambda = 0,11(\Delta e / 4R)^{0,25}.$$

В этих формулах Δe – эквивалентная шероховатость трубопровода, ω – площадь живого сечения потока, χ – смоченный периметр.

Особое место занимают опыты на лотке с поверхностью, подвергнувшейся длительному воздействию атмосферных осадков и морозам. Покрытие в этом лотке, как показало время, было вполне недостаточно прочным. Однако такие поверхности тоже встречаются, и опыты имеют свою ценность. В будущем предполагается на этом лотке провести опыты с реальным дождем.

Следует также отметить положительное влияние на выполненные измерения автоматического датчика глубины слоя воды, подключенного к самопишущему прибору. Датчик прошел государственную метрологическую аттестацию и, по заключению, имеет предел основной погрешности 0,4 мм водяного столба в диапазоне от 0,1 до 10 мм. Запись глубины слоя во времени позволяла контролировать ход опыта и повысить точность измерений.

На ВПП в аэропорту Киев (Жуляны), на участке, где были выполнены опыты, шероховатость поверхности составила 0,44 мм. Опыты проводились (рис. 6) еще до реконструкции ВПП и кроме существенной неровности покрытия (плиты были уложены еще в конце 40-х годов, причем размер плит был небольшим – 3 на 4 м), определенное влияние на течение воды оказывали не всегда качественно выполненные температурные швы между плитами – швы заполнялись мастикой «с запасом» и значительно выступали над поверхностью покрытия.

Лоток на ВПП имел ширину 1 м и длину 12...20 м. Шероховатость поверхности составляла, в среднем, 0,44 мм. На основании этих опытов для ламинарного течения по значительно неровной поверхности с температурными швами, плохо заполненными мастикой, получено:

$$\lambda = 344/Re. \quad (6)$$

На ВПП в аэропорту Минеральные Воды (рис. 7) бетон имел значительно лучшее состояние. Плиты там были размером 7,5 на 15 м и уложены сравнительно недавно. Швы между ними на те-

чение воды практически не влияли. Лоток имел ширину 1 м а длину – 19...35м. Особенностью этой ВПП были также специальные борозды глубиной 2...3 мм, которые устраивались на поверхности после укладки бетона и служили для улучшения водоотвода и повышения сцеплении пневматиков с поверхностью покрытия. Борозды проходили перпендикулярно оси ВПП и, как правило, совпадали с уклоном и направлением стока воды. Видимо, эта особенность поверхности ВПП и стала причиной значительного снижения коэффициента λ (рис.8).

е-
и.
ы
а-
то
и,

е-
яя
сь
ия
ая
ой
н-

ов
ля

3:
р-

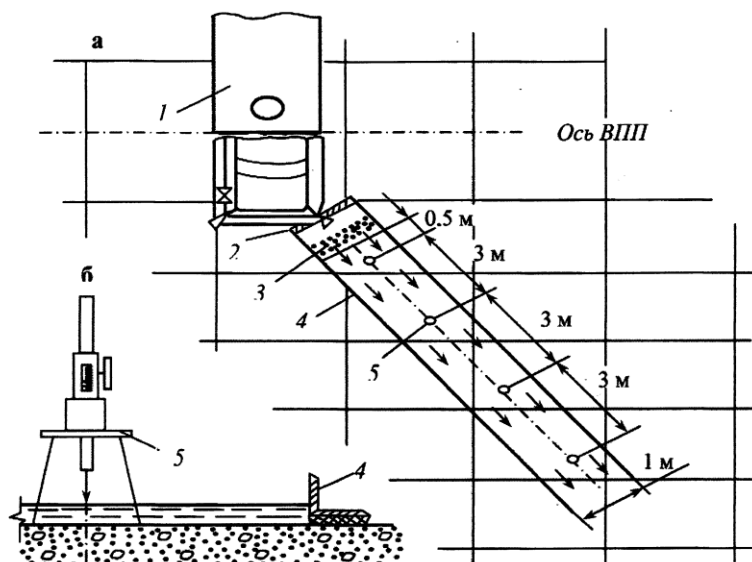


Рис. 6. Схема проведения опыта на взлетно-посадочной полосе в аэропорту Киев:
а – схема размещения машины с запасом воды 1 и лотка 4; 2 – водонепроницаемая перегородка; 3 –
успокоитель, слой гравия; 5 – точки измерения глубины шпигунным масштабом;
б – схема установки шпигунного масштаба в лотке в разрезе

На заключительном этапе в лаборатории на стенде, показанном на рис.3, были проведены предварительные исследования влияния капель дождя на течение транзитного потока. Наблюдения показали, что капли дождя в этих опытах не привели к турбулизации основного потока, который остался ламинарным. Однако, в опыте расход от дождя составлял около трети транзитного потока. Как указывалось, в связи со значительными длинами стока на ВПП следует ориентироваться, в основном, на транзитные потоки.

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что существующие в аэродромной практике и практике проектирования автодорог зависимости для определения глубины слоя воды справедливы лишь для турбулентных потоков, в то же время стекание воды при атмосферных осадках происходит, зачастую, при ламинарном режиме и наблюдаемые при этом глубины значительно превышают расчетные. Для потоков малой глубины на плоских покрытиях критические числа Рейнольдса получены порядка 3000, что существенно больше, чем для обычных потоков.

а-
в
юй



Рис. 7. Проведение опытов на взлетно-посадочной полосе аэропорта Минеральные Воды: подготовка и проведение измерений

ие.
те-

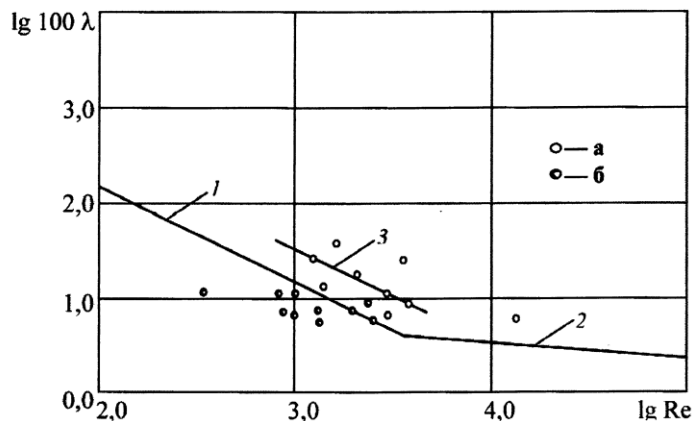


Рис. 8. Зависимости коэффициентов сопротивления λ для потоков малой глубины на бетонной поверхности ВПП от режима течения (от чисел Рейнольдса):

а – в аэропорту Киев ($\Delta = 0.44$ мм и частые швы между плитами); б – в аэропорту Минеральные Воды ($\Delta = 0.4$ мм и продольные борозды глубиной 2...3 мм); 1 – линия соответствует линии 2 рис. 4а – ламинарному потоку на сравнительно гладкой поверхности; 2 – то же турбулентному потоку на сравнительно гладкой поверхности; 3 – ламинарный поток на достаточно неровной поверхности.

2. Для сравнительно гладких поверхностей при ламинарном течении в лаборатории коэффициенты сопротивлений получены в 1,7 раза больше общепринятых. На поверхности двух взлетно-посадочных полос с различной степенью видимой неровности получены коэффициенты сопротивлений как больше лабораторных, так и меньше. Уточнить расчетные коэффициенты наиболее просто пробными проливками конкретной поверхности покрытия после окончания строительных работ.

3. С учетом уточненных зависимостей, на основании нивелирной съемки поверхности и показаний датчика, расположенного в характерной точке покрытия, могут быть установлены реальные изолинии глубин на всей поверхности покрытия. На основании натурных наблюдений представляется, что на ВПП расстояние между соседними датчиками не должно превышать 1 км. Датчики целесообразно располагать в конце склона наибольшей длины, где глубина потока будет также наибольшей.

Список литературы

1. Руководство по аэропортовым службам: Часть 2. Состояние поверхности покрытий. ICAO, Монреаль, 2002. – 90 с.
2. Наставление по аэродромной службе в гражданской авиации СССР (НАС-ГА-86). – М.: Воздушный транспорт, 1987. – 287 с.
3. Руководство по проектированию водоотвода и дренажа на летном поле аэродрома. – М.: МГА, ГПИИНИИ «Аэропроект», 1982. – 60 с.
4. Бабков В.Ф., Горецкий Л.И., Смирнов А.С., Глушков Г.И. Изыскания и проектирование аэродромов. – М.: Транспорт, 1981. – 616 с.
5. Вестник Харьковского автомобильно-дорожного университета. Сборник научных трудов. – Выпуск 47. – Харьков, 2009. – 163 с.
5. Кривенко Ю.М. Дистанційний контроль стану поверхні злітно-посадкових смуг. / Вісник Національного авіаційного університету. – К., 2002. – 1 (12). – С.188–192.
6. Кривенко Ю.Н., Андрущак Л.Н. КИИГА. Авт. свид. №1125473 «Датчик глубины слоя жидкости на поверхности покрытия» МКИ 01 23/14. Опубл. 23.11.84, бюл.№43.

УДК 625.731

В.Я. САВЕНКО, доктор технічних наук